

**Ein Gerät
zur Untersuchung der kurzfristigen Schwankungen
meteorologischer Parameter**

Rainer Roth

1984

Ein Gerät
zur Untersuchung der kurzfristigen Schwankungen
meteorologischer Parameter

Inaugural-Dissertation
zur
Erlangung der Doktorwürde
der
Hohen Naturwissenschaftlichen Fakultät
der
Ludwig-Maximilians-Universität
zu München

vorgelegt
von

Rainer Roth

aus
Spich Bez. Köln

Juni 1964

1. Berichterstatter: Prof. Dr. G. Hofmann

2. Berichterstatter: Prof. Dr. F. Möller

Tag der mündlichen Prüfung: 22 Juli 1964



Die vorliegende Arbeit ist im März 1965 in den Wissenschaftlichen Mitteilungen des Meteorologischen Instituts der Universität München Nr. 10 erschienen.

Inhalt

	Seite
Roth, R.: Ein Gerät zur Untersuchung der kurzfristigen Schwankungen meteorologischer Parameter	1
Zusammenfassung	1
1. Einleitung	2
2. Das Meß- und Rechenproblem	4
2.1 Allgemeines	4
2.2 Das Rechenproblem	5
2.3 Das Meßproblem	9
Die Abgrenzung des Frequenzintervalls	10
Die Untersuchungen von H.E. Cramer	10
2.4 Die Begrenzung des Frequenzbereiches durch die Meßanordnung	
2.5 Überlegungen zur Wahl der Meßperiode	15
3. Die Beschreibung des Gerätes	19
3.1 Die Rechenoperationen	19
3.2 Der Programmablauf während einer Meßperiode	20
3.3 Die verwendeten Zahlensysteme	22
3.4 Bauteile des Gerätes	22
Der Drehwähler	23
Das Relais	24
Halbleiterbauelemente	25
3.5 Baugruppen und spezielle technische Probleme	25
Binäruntersetzer und Schieberegister	25
Die Multipliziermatrix	27
Die abschließenden Rechnungen	29
3.6 Der Funktionsplan	31
Die kontinuierliche Berechnung der Streuungen und der Kovarianz	33
Die Berechnung von Autokorrelationskoeffizienten	35
3.7 Schlußbemerkungen zum technischen Teil	36

	Seite
4. Diskussion der Meß- und Rechenfehler	38
4.1 Die Fehler infolge der begrenzten Anzahl der Meßwerte	41
4.2 Die Fehler durch die begrenzte Auflösung und dem begrenzten Meßbereich des Analog-Digital-Umwandlers	41
4.3 Fehler des Temperaturmeßfühlers	44
4.4 Die Meßbrücke	51
4.5 Das Galvanometer	51
5. Diskussion einiger Meßergebnisse	51
5.1 Der Gang der Streuungen der Lufttemperatur in zwei ausgewählten dreistündigen Meßperioden	52
Die Streuung der Lufttemperatur am 11.8. 1963 in der Zeit von 15 ³⁰ bis 18 ³⁰ MOZ	55
Die Streuung der Lufttemperatur am 13.7.1963 von 00 ⁰⁰ bis 02 ³⁴ MOZ	58
5.2 Die vertikale Austauschweglänge	61
5.3 Die Beziehung zwischen der Austauschweglänge und der Kovarianz der Temperaturschwankungen in 5 und 20 m Höhe	65
6. Der horizontale turbulente Strom fühlbarer Wärme	67
6.1 Die Meßergebnisse von H.E. Cramer	68
6.2 Die Deutung der Meßergebnisse	69
6.3 Spezielle Überlegungen zum horizontalen turbulenten Strom fühlbarer Wärme	71
7. Schluß	72
Literaturverzeichnis	74

Ein Gerät zur Untersuchung der kurzfristigen
Schwankungen meteorologischer Parameter*

von Rainer Roth

Zusammenfassung

Es wird ein Gerät beschrieben, das die Streuungsquadrate $\overline{x^2}$, $\overline{y^2}$ und die Kovarianz $\overline{xy}$ zweier meteorologischer Parameter $x(t)$, $y(t)$ im Frequenzbereich von 0,002 bis 2 Hz im Abstand von 6 Minuten berechnet, wobei an die erste Stelle des zweiten Parameters $y(t)$ der zeitlich verschobene erste $x(t - \Delta t)$ treten kann (Autokorrelation). Die Problematik von Turbulenzmessungen wird diskutiert und die speziellen Fehler des Gerätes werden aufgezeigt. Einige Messungen der Streuung der Lufttemperatur und der Kovarianz, die mit dem Gerät an der meteorologischen Station am Forschungsreaktor München in Garching gewonnen wurden, werden diskutiert. An Hand von Messungen anderer Autoren wird gezeigt, unter welchen Bedingungen ein merklicher horizontaler turbulenter Wärmestrom auftritt.

*Diese Arbeit wurde als Inaugural-Dissertation zur Erlangung der Doktorwürde der Hohen Naturwissenschaftlichen Fakultät der Ludwig-Maximilians-Universität zu München vorgelegt

1. EINLEITUNG

=====

Die atmosphärischen Strömungen verlaufen turbulent. Das heißt, daß in einem atmosphärischen Strömungsfeld der Momentanwert z.B. der Windgeschwindigkeit dauernd von dem über ein Zeitintervall Δt gebildeten Mittelwert abweicht. Kennt man den Mittelwert der Windgeschwindigkeiten in dem Intervall Δt , so kann man den Momentanwert darstellen als Summe des Mittelwertes und der Abweichung von diesem Mittelwert:

$$w = \bar{w} + w' \quad (1.1)$$

In Formel (1.1) ist w der Momentanwert der Windgeschwindigkeit, $\bar{w}$ der Mittelwert über die Zeit Δt , entsprechend

$$\bar{w} = \frac{1}{\Delta t} \int_{-\frac{\Delta t}{2}}^{+\frac{\Delta t}{2}} w dt \quad (1.2)$$

gebildet, und w' die Abweichung des Momentanwertes vom Mittelwert $\bar{w}$.

Diese Art der Zerlegung kann man für alle Eigenschaften der Luft durchführen. Als Beispiele seien genannt: Impuls, Wärmeinhalt (Enthalpie), Gehalt an Beimengungen (Gase, Staub u.a.). Die dem w' entsprechenden Werte, turbulente Schwankungen oder turbulente Zusatzgrößen genannt, sind in mannigfacher Weise mit anderen Größen verknüpft, die atmosphärische Vorgänge beschreiben. So hängt beispielsweise der turbulente Impulstransport eng mit den Windschwankungen zusammen, der turbulente Transport fühlbarer Wärme außer mit den Windschwankungen mit denen der Temperatur. Ähnlich ist es mit dem turbulenten Transport von Luftbeimengungen (z.B. Wasserdampf, radioaktive Verunreinigungen). Dichteschwankungen beeinflussen die Ausbreitung der elektromagnetischen Wellen.

Das Flimmern der Sterne am Nachthimmel ist u.a. eine Folge dieser Dichteschwankungen in der über dem Beobachter liegenden Luftmasse.

Mit diesen Fragen befaßt sich ein großer Teil der modernen meteorologischen Literatur. Vor allen Dingen bemüht man sich an vielen Stellen um die theoretische Behandlung des Turbulenzproblems. Messungen von turbulenten Schwankungsgrößen sind bisher nur in Einzelfällen durchgeführt und analysiert worden.

Deshalb wurde ein Gerät gebaut, das im Dauerbetrieb automatisch Schwankungsgrößen mißt und verarbeitet. Zusammen mit der Anlage, die bei der Station des Meteorologischen Institutes beim Forschungsreaktor München in Garching läuft [12], und mit Meßfühlern, die sich zum Teil noch in Entwicklung befinden, soll das Gerät unter anderem bei Untersuchungen über den Wärmehaushalt der Erdoberfläche und bei Untersuchungen über die Ausbreitung von Luftbeimengungen eingesetzt werden.

Der Betrieb des Gerätes im Rahmen der bereits vorhandenen umfangreichen Meßanlage mußte bei der Entwicklung berücksichtigt werden. Nähere Einzelheiten werden bei der Beschreibung des Gerätes und seiner Funktionsweise besprochen.

Welche meteorologischen Parameter untersucht werden, ist nur eine Frage des Meßfühlers. Durch die Konstruktion des Gerätes ist lediglich der Frequenzumfang festgelegt, wenngleich Änderungen durch Umbauten in beschränktem Umfang möglich sind. Daß die turbulenten Zusatzgrößen nur in einem festen Frequenzintervall gemessen und verarbeitet werden, ist sinnvoll, da für bestimmte Probleme auch nur bestimmte Frequenzintervalle von Bedeutung sind.

So ist z.B. bei der Betrachtung des turbulenten Stromes fühlbarer Wärme in Bodennähe jener Teil des Spektrums bedeutungslos, der von den Hoch- und Tiefdruckgebieten herührt. Das gleiche gilt für die tägliche Schwankung, d.h. für den Tagesgang der meteorologischen Parameter.

2. D A S M E S S - U N D R E C H E N P R O B L E M =====

2.1) Allgemeines

Wenn man die Schwankungen einer Eigenschaft in einem Strömungsfeld untersuchen will, gibt es zwei Betrachtungsweisen und dementsprechend auch zwei Meßmethoden. Die erste untersucht die Strömung an einem festen Ort (Betrachtungsweise nach Euler), die zweite verfolgt ein Teilchen in der Strömung und untersucht dessen Veränderungen (Betrachtungsweise nach Lagrange). Meßtechnisch ist die ortsfeste Messung wesentlich einfacher.

Die Verfolgung von Teilchen in der Strömung ist meist sehr schwierig. Zum Studium der großräumigen Turbulenz kann man die Bahnen von Schwebeballons untersuchen. Entsprechend der Größe der Pilotballone ist es natürlich nur möglich turbulente Strukturen zu untersuchen, deren räumliche Dimensionen ein vielfaches des Ballondurchmessers betragen. Als Beispiel für diese Methode seien die Arbeiten von L.F. Richardson und D. Proktor [24] und R. Marquardt [20] hier angeführt.

Unter Laborbedingungen hat F.I. Badgley [1] die Bahnen von Zellulosestaub mit einer Filmkamera verfolgt und daraus Rückschlüsse auf die Turbulenz gezogen.

Eine Laboruntersuchung der Lagrange'schen Autokorrelationsfunktion unter verschiedenen Bedingungen hat P. Frenzen [8] durchgeführt.

Die Beobachtung von Rauchfahnen erlaubt ebenfalls eine gewisse qualitative Beurteilung der Turbulenz [3]. In [21] sind einige idealisierte Rauchfahnenbilder zusammengestellt und ihre Abhängigkeit von der Temperaturschichtung wird aufgezeigt.

Messungen der turbulenten Schwankungen meteorologischer Parameter an einem festen Punkt wurden u.a. von H.E. Cramer et. al. [4], E. Frankenberger [7], A.S. Gurwich und L.R. Zwang [9] und W.C. Swinbank [25] durchgeführt.

2.2) Das Rechenproblem

Die letztgenannten Arbeiten umfassen aber immer nur eine relativ kleine Anzahl von Einzeluntersuchungen. Das ist verständlich, wenn man sich überlegt, wieviele Meßwerte nötig sind, um Aussagen über die Turbulenz machen zu können. An einem Beispiel wird das deutlich. Um den Teil des Turbulenzspektrums zu erfassen, der zum Beispiel mit dem turbulenten Strom fühlbarer Wärme in 16 m Höhe verknüpft ist, sind Messungen im Zeitabstand von ca. 100 ms über 1-2 Stunden erforderlich. Dies liefert allein bei einer Meßserie ca. 50 000 Einzelwerte je Meßstelle. Um an Hand dieser Fülle von Messungen irgendwelche Aussagen machen zu können, ist es erforderlich, aus diesem Kollektiv Maßzahlen zu gewinnen, die einen Einblick in die Struktur des Kollektivs gestatten.

Die einfachste Zahl dieser Art ist der Mittelwert, bei dem aber gerade die von der Turbulenz herrührenden Schwankungen eliminiert sind. Über den Mittelwert lassen sich aber die turbulenten Zusatzgrößen definieren (1.1) . Mit diesen erhält man die Streuung σ_x einer Meßgröße x , die als

$$\sigma_x = \sqrt{\overline{x\dot{x}}} = \sqrt{\overline{\dot{x}^2}} \quad (2.2.1)$$

d.h. als Wurzel aus dem mittleren Schwankungsquadrat definiert ist. Das ist die einfachste Maßzahl, die etwas über die Veränderlichkeit innerhalb eines Kollektivs von Meßwerten aussagt, wenn man von Größen wie der Differenz zwischen größtem und kleinstem Wert, gewonnen aus einer beschränkten Anzahl von Meßwerten, absieht.

Mißt man mit zwei Meßfühlern x und y gleichzeitig, so kann man neben den Streuungen σ_x und σ_y auch noch die Kovarianz

$$\mu_{x,y} = \overline{\dot{x}\dot{y}} \quad (2.2.2)$$

berechnen. Kovarianzen sind in der Meteorologie für die Untersuchung von Eigenschaftsströmen von großer Bedeutung [23] . Davon wird bei der Diskussion von Meßergebnissen noch die Rede sein.

Aus den Streuungen σ_x , σ_y und der Kovarianz $\mu_{x,y}$ von zwei Meßwert-Kollektiven läßt sich durch die Beziehung

$$r_{x,y} = \frac{\mu_{x,y}}{\sigma_x \cdot \sigma_y} \quad (2.2.3)$$

der Korrelationskoeffizient $r_{x,y}$ berechnen, der ein Maß für den stochastischen Zusammenhang der beiden Kollektive ist. Einen Überblick über das Turbulenzspektrum kann man gewinnen, wenn man untersucht, welchen Beitrag einzelne Frequenzintervalle zur Streuung liefern.

Sollen die Schwankungen einer Meßgröße im Abstand von 0,1 s dauernd verfolgt werden, so erhält man rund 1 Million Meßwerte im Tag.

Bei mehr Meßgrößen oder bei häufigerer Ablesung, z.B. um den erfaßten Frequenzbereich zu erweitern, wächst die Zahl der Meßwerte rasch weiter an. Auch mit Hilfe von elektronischen Rechenmaschinen ist die Bewältigung dieser Fülle von Meßdaten nicht leicht. Die Speicherung der Daten etwa mit Hilfe von Lochstreifen zur späteren Verarbeitung erfordert einen erheblichen Aufwand bei den Datenträgern. So würde man beispielsweise bei der Speicherung der vom hier beschriebenen Gerät verarbeiteten Daten auf Lochstreifen täglich etwa 2 km Lochstreifen benötigen.

Die direkte Einspeisung der Daten in ein Rechenggerät, das die interessierenden Maßzahlen errechnet und in größeren Zeitabständen herausschreibt, erscheint daher zweckmäßig. Allerdings ist dann dieses Gerät für andere Aufgaben blockiert, so daß der Einsatz eines teuren käuflichen Gerätes nicht zuletzt an den Kosten scheitert. Hierin liegt sicherlich auch der Grund, warum bisher nur Einzelfälle untersucht wurden.

Andererseits sind es - wenn man sich auf die oben angegebenen Kollektivmaßzahlen der Streuungen und Kovarianzen beschränkt - immer wieder die gleichen Rechnungen, denen die Meßwerte unterworfen werden. Daher erscheint der Bau eines nur diese Rechnungen ausführenden einfachen, und daher vergleichsweise billigen, Gerätes sinnvoll. Dieses wurde mit dem hier beschriebenen Gerät versucht, wobei es so ausgelegt wurde, daß in interessierenden Einzelfällen die Daten auch für andere Arten der Verarbeitung zur Verfügung stehen.

Ein wesentlicher Gesichtspunkt für die Konstruktion des Gerätes war also die Tatsache, daß die Rechenoperationen, die Streuung und Kovarianz liefern, zwar sehr umfangreich, aber im Prinzip doch einfach sind.

Desgleichen sind die Ansprüche an die Rechengeschwindigkeit (Meßwertfolge 240 ms) nur sehr bescheiden, wenn man sie mit den Leistungen der kommerziellen elektronischen Rechenmaschinen vergleicht. Außerdem braucht ein Gerät, das immer die gleichen Rechenoperationen ausführen soll, nicht programmierbar zu sein, sondern es genügt, wenn es von vorn herein nur auf diese spezielle Aufgabe hin entwickelt wird.

Da in der Meteorologie die Kovarianzen $\overline{\dot{x}\dot{y}}$ eine große Rolle spielen, liegt es nahe, diese zu berechnen. Mit dem gleichen Rechenschema und dem gleichen Aufwand lassen sich auch die Streuungen σ_x, σ_y berechnen, wenn man auf die Ziehung der Quadratwurzel verzichtet und $\sigma_x^2 = \overline{\dot{x}^2}$, $\sigma_y^2 = \overline{\dot{y}^2}$ angibt. Ein Vergleich der Formel (2.2.1) und (2.2.2.) macht das deutlich.

Dies ermöglicht dann die Berechnung des Korrelationskoeffizienten

$$r_{x,y} = \frac{\overline{\dot{x}\dot{y}}}{(\overline{\dot{x}^2} \cdot \overline{\dot{y}^2})^{1/2}} \quad (2.2.4)$$

Weiterhin ist ein Einblick in die spektrale Verteilung möglich, wenn man den Autokorrelationskoeffizienten

$$r_{x,x(\Delta t)} = \frac{\overline{\dot{x}(t) \cdot \dot{x}(t-\Delta t)}}{(\overline{\dot{x}^2(t)} \cdot \overline{\dot{x}^2(t-\Delta t)})^{1/2}} \quad (2.2.5)$$

als Funktion der Zeit Δt berechnet [22]. Auf die theoretischen Grundlagen soll hier nicht näher eingegangen werden, da Untersuchungen dieser Art erst zu einem späteren Zeitpunkt stattfinden sollen.

Experimentell tritt hier die Schwierigkeit auf, daß die gleichen Daten mehrmals verarbeitet werden müssen, d.h. die einzelnen Meßwerte müssen gespeichert werden, so daß sie für Rechnungen mit verschiedenen Δt zur Verfügung stehen. Außerdem muß eine Möglichkeit geschaffen werden, den zur Zeit von einem Datenspeicher entnommenen Wert mit dem zur Zeit $t - \Delta t$ gehörenden Wert zu kombinieren, was ebenfalls einen Speicher erfordert. Beide Speicher sind als Zusatzgeräte gebaut worden.

Es ist allerdings zu bemerken, daß die Berechnung der Autokorrelationsfunktion $r_{x,x(\Delta t)}$ für mehr als einen Δt - wert zur Folge hat, daß dann das Gerät für die Verarbeitung aktueller Messungen ausscheidet. Somit können also entweder Streuungen und Kovarianz aktueller Werte fortlaufend gemessen werden, oder man kann die Autokorrelationsfunktion gespeicherter Meßwerte bestimmen.

2.3) Das Meßproblem

Das Gerät löst also zunächst das Rechenproblem. Welche meteorologischen Größen man untersucht, ist eine Frage des Meßfühlers. Die Konstruktion von trägheitsarmen Meßfühlern für Turbulenzuntersuchungen ist ein spezielles Problem der meteorologischen Meßtechnik. So wird im Rahmen einer Diplomarbeit am Meteorologischen Institut der Universität München ein Meßfühler für die vertikale Komponente der Windgeschwindigkeit entwickelt. Relativ einfach ist die Konstruktion eines trägheitsarmen Temperaturmeßfühlers. Da das Schwergewicht dieser Arbeit auf dem Bau und der Erprobung des Rechengerätes lag, wurden bisher nur Messungen der kurzfristigen Schwankungen der Lufttemperatur durchgeführt.

Die Abgrenzung des Frequenzintervalles.

Bevor man in Einzelheiten des Gerätes, der Meßprobleme und der Meßergebnisse eindringt, ist es zweckmäßig, sich ein Bild von den kurzfristigen Temperaturschwankungen zu machen.

Als kurzfristig sollen jene Schwankungen bezeichnet werden, die zum turbulenten Strom fühlbarer Wärme L einen Beitrag liefern. Dieser ergibt sich aus [23] zu

$$L = - \rho c_p \overline{wT} \quad (2.3.1)$$

wobei	ρ	die Dichte der Luft,
	c_p	die spezifische Wärme der Luft bei konstantem Druck,
	$\overline{w}$	die turbulente Zusatzgröße der vertikalen Windgeschwindigkeit
und	$\overline{T}$	die turbulente Zusatzgröße der Lufttemperatur ist.

Nach G. Hofmann [13] gilt Formel (2.3.1.) jedoch nur, wenn man die Auswirkungen der Dichteschwankungen vernachlässigen kann, d.h. wenn man $\rho = \text{const}$ annimmt.

Die Untersuchungen von H.E. Cramer.

In [4] wird für einige Fälle das Spektrum der Größen $\overline{wT}$ und σ_T^2 , die aus Messungen in 16 m Höhe gewonnen wurden, in Abhängigkeit von $\frac{n}{\bar{u}}$ angegeben, wobei n die Frequenz, $\bar{u}$ die mittlere Windgeschwindigkeit und $\frac{n}{\bar{u}}$ somit die Wellenzahl ist.

Die Abbildung 1 zeigt das Spektrum von $\overline{wT}$ für einige Meßintervalle bei Tage, Abbildung 2 zeigt das Spektrum für einige nächtliche Meßintervalle. Die nächtlichen

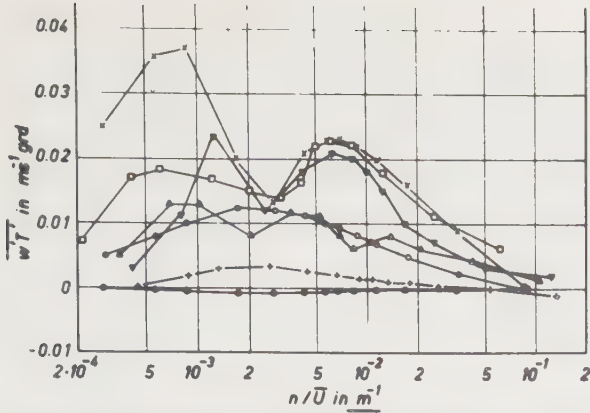


Abb. 1: Frequenzspektrum der Größe wT in 16 m Höhe für verschiedene Messungen unter Tags (nach H.E.Cramer e.a.[4]).

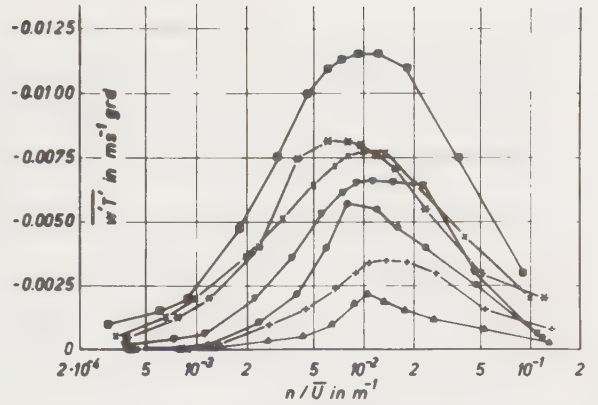


Abb. 2: Frequenzspektrum der Größe wT in 16 m Höhe für verschiedene Messungen während der Nacht (nach H.E.Cramer e.a.[4]).

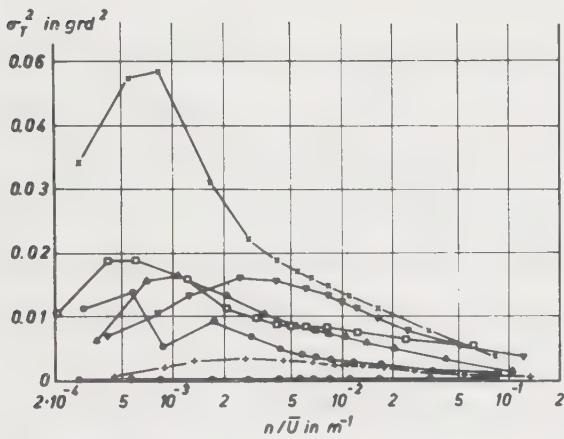


Abb. 3: Frequenzspektrum der Varianz der Lufttemperatur T in 16 m Höhe für verschiedene Messungen unter Tags (nach H.E.Cramer e.a.[4]).

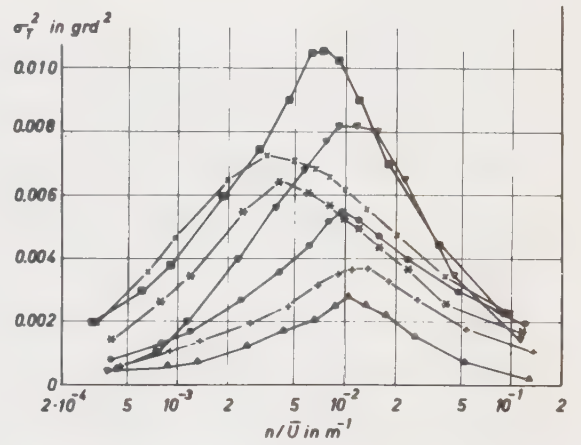


Abb. 4: Frequenzspektrum der Varianz der Lufttemperatur T in 16 m Höhe für verschiedene Messungen während der Nacht (nach H.E.Cramer e.a.[4]).

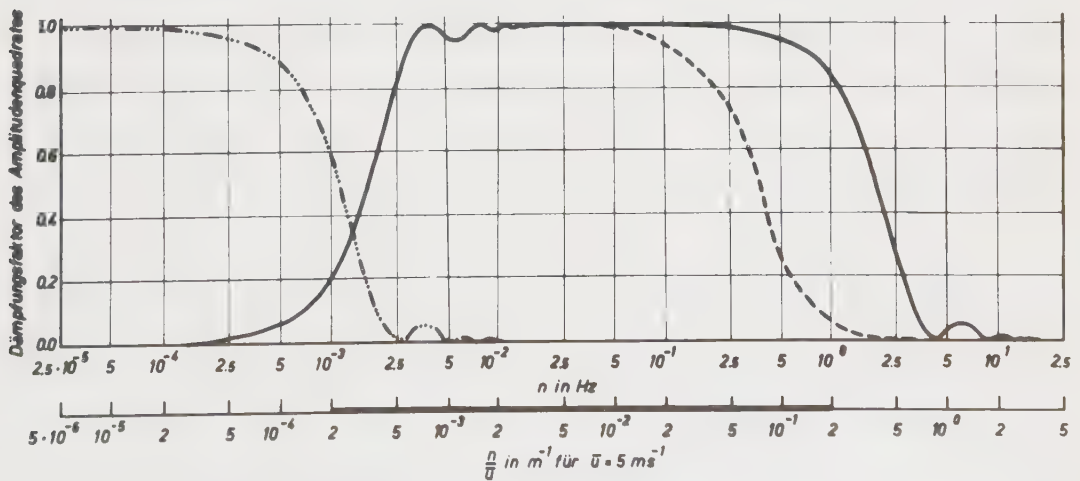


Abb. 5: Filterkurven für verschiedene Meßanordnungen

- a.) ————— : Frequenzbereich bei Wahl von $\Delta=246$ s und $f=0,24$ s
- b.) - - - - - : Untere Begrenzung des Spektrums durch das Galvanometer (Multiflex MG 1, Fa.Lange)
- c.) - · - · - : Untere Begrenzung des Spektrums für $d=360$ s.

Spektren zeigen einen einheitlichen Verlauf, der bei $\frac{n}{u} = 0,01 \text{ m}^{-1}$ sein Maximum annimmt. Die aus Messungen bei Tage abgeleiteten Spektren, Abbildung 1, zeigen eine Doppelgipfligkeit mit einem Maximum zwischen $\frac{n}{u} = 0,01 \text{ m}^{-1}$ und $\frac{n}{u} = 0,05 \text{ m}^{-1}$ und einem weiteren, das in zwei Fällen das erste überragt, bei $\frac{n}{u} = 0,001 \text{ m}^{-1}$. Bei dem Vergleich der Abbildungen 1 und 2 ist zu beachten, daß sich der Maßstab der Ordinate in Vorzeichen und Betrag unterscheidet.

Das Maximum bei $\frac{n}{u} = 0,01 \text{ m}^{-1}$, das tagsüber und nachts auftritt, kann man der dynamisch erzeugten Turbulenz und damit dem durch den Austausch bewirkten Strom fühlbarer Wärme zuordnen. Das zweite Maximum wird durch die thermische Konvektion, die tagsüber bei labiler Schichtung wirksam wird, erzeugt. Die Größenordnung der Wellenzahl, die Wellenlängen von etwa 1 000 m entspricht, deckt sich gut mit dem Bild, das sich die Segelflieger von der thermischen Konvektion (Thermik) machen. Sehr bemerkenswert ist, daß eine Doppelgipfligkeit beobachtet wird, was besagt, daß schon in 16 m Höhe sich die thermische Konvektion deutlich bemerkbar macht und daß es sich um zwei getrennte Mechanismen handelt. Die Ergebnisse deuten darauf hin, daß die thermische Konvektion nicht nur ein modifizierter Austausch mit einem zum langwelligen verschobenen Frequenzbereich ist.

Außerdem scheint es so, als ob sich tagsüber das Maximum in der Nähe von $\frac{n}{u} = 0,01 \text{ m}^{-1}$ etwas zu niederen Frequenzen hin verschiebt, wenn man es mit den Ergebnissen der nächtlichen Messungen vergleicht. Das würde bedeuten, daß die stabile Schichtung bei Nacht die niederen Frequenzen stärker dämpft als die höheren.

Betrachtet man jetzt den gesamten dargestellten Spektralbereich, so sieht man, daß nachts das Spektrum im langwelligen und kurzwelligen Bereich abfällt und monoton gegen kleinere Werte strebt. Anders ist es für die Meßergebnisse, die bei labiler Schichtung gewonnen wurden. Hier schneidet der dargestellte Frequenzbereich, der meßtechnisch bedingt ist, einen Teil des langwelligen konvektionsbedingten Spektrums ab.

Abschließend läßt sich zu den Abbildungen 1 und 2 sagen, daß sie einen Überblick über das Spektrum des turbulenten Stromes fühlbarer Wärme vermitteln. Welchen Beitrag die Bereiche liefern, die nicht erfaßt wurden, (besonders im langwelligen) läßt sich im Einzelfall prinzipiell abschätzen, jedoch darf man sagen, daß das Frequenzintervall den durch dynamische Turbulenz bedingten Wärmestrom ganz erfaßt. So können diese Spektren näherungsweise als Maßstab für das Frequenzintervall dienen, in dem mit dem hier beschriebenen Gerät gemessen wird. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, daß es sich um Messungen an einem anderen Ort handelt. Jedoch darf man annehmen, daß die dortigen Verhältnisse wenigstens nicht größenordnungsmäßig von denen in Garching abweichen.

Da bisher mit dem hier beschriebenen Gerät nur Temperaturschwankungen gemessen wurden, sind aus diesem Grund noch die Abbildungen 3 und 4 aus [4] übernommen worden. Sie zeigen verschiedene Spektren von Temperaturschwankungen, und zwar Abbildung 3 für Messungen unter Tags und Abbildung 4 für Messungen in den Nachtstunden. (Abb. 3 und Abb. 4 haben verschiedenen Ordinatenmaßstab!)

2.4.) Die Begrenzung des Frequenzbereiches durch die Meßanordnung.

An Hand eines einfachen Modells leitet C.H.B. Pasquill [22] ab, wie die Meßanordnung das Frequenzintervall bestimmt. Dazu müssen zunächst zwei Zeiten definiert werden: Δ , als diejenige Zeit, über die sich die Meßperiode erstreckt, und die Zeit δ , die dem Abstand zwischen zwei Einzelmessungen entspricht, wobei Pasquill annimmt, daß der Meßfühler über die Zeit δ mittelt. Diese beiden Zeiten begrenzen den Frequenzbereich, der von der Meßanordnung erfaßt wird bei hohen (δ) und tiefen (Δ) Frequenzen. Der Beitrag, den eine beliebige Frequenz n zur Varianz, d.h. dem Quadrat der Streuung liefert, wird auf den Bruchteil

$$\frac{\sin^2 \pi n \delta}{(\pi n \delta)^2} \left(1 - \frac{\sin^2 \pi n \Delta}{(\pi n \Delta)^2} \right)$$

reduziert, wobei der erste Faktor die hohen, der zweite die niederen Frequenzen abschneidet.

Für das hier beschriebene Gerät wurde $\delta = 0,240$ s und $\Delta = 465$ s gewählt. Die sich nach der obigen Formel ergebene Filterkurve ist in Abbildung 5 (ausgezogene Kurve) dargestellt. Definiert man als Durchlaßbereich jenes Intervall, in dem der Beitrag der Schwankungen zur Varianz um weniger als 50 % unterdrückt ist, so erfaßt das Gerät die Schwankungen der meteorologischen Parameter von 0,002 bis 2 Hz, d.h. Schwingungsdauern zwischen etwa 8 min. und 0,5 sec.

Zur Zeit wird allerdings das Spektrum im kurzwelligen Teil durch die eingesetzten Galvanometer noch weiter beschränkt, als es die oben angegebene Filterkurve zeigt.

Die mit einem Frequenzgenerator bestimmte Amplitudendämpfung der Galvanometer ist in Abbildung 5 gestrichelt eingezeichnet. Durch die Galvanometer wird die obere Grenze des Frequenzintervalles auf 0,38 Hz festgelegt. Der Einsatz von schnelleren Galvanometern ist geplant, so daß dann der ganze Bereich von 0,002 bis 2 Hz erfaßt wird.

Die Abbildung 5 enthält zum besseren Vergleich mit den Abbildungen 1 bis 4 noch einen zweiten Abszissenmaßstab, wo für eine Windgeschwindigkeit von 5 m/s, was etwa der mittleren Windgeschwindigkeit entspricht, mit der die Kurven der Abbildungen 1 bis 4 normiert wurden, die Frequenz in Wellenzahlen umgerechnet ist. Der Abszissenbereich der Abbildungen 1 bis 4 ist dabei durch eine dickere Linie hervorgehoben.

2.5) Überlegungen zur Wahl der Meßperiode.

Die an der meteorologischen Station beim Forschungsreaktor München arbeitende Digitalmeßanlage liest die interessierenden meteorologischen Parameter 10 mal in der Stunde, d.h. jede Meßgröße einmal im zeitlichen Abstand von 6 Minuten, ab. Da das hier beschriebene Gerät ebenfalls dort eingesetzt wird, erschien es zweckmäßig, auch die Schwankungsgrößen $\overline{x^2}$, $\overline{y^2}$ und $\overline{xy}$ im gleichen Abstand zu gewinnen. Dabei können die Wertepaare x_i, y_i in den aufeinanderfolgenden Meßperioden durchaus verschiedene Größen sein, also je nach den angeschlossenen Meßfühlern beispielsweise die Temperaturen in zwei verschiedenen Höhen ($\overline{T_1^2}, \overline{T_2^2}, \overline{T_1 T_2}$), der Vertikal- und Horizontalwind in der gleichen Höhe ($\overline{w^2}, \overline{u^2}, \overline{wu}$: Messung der Schubspannung), der Vertikalwind und die Temperatur in der gleichen Höhe ($\overline{w^2}, \overline{T^2}, \overline{wT}$: Messung des Stromes fühlbarer Wärme) oder auch die Temperatur

in einer bestimmten Höhe und ihr um Δt vorher gemessener Wert ($\overline{T_{(t)}^2}$, $\overline{T_{(t-\Delta t)}^2}$, $\overline{T_{(t)}T_{(t-\Delta t)}}$: Messung des Autokorrelationskoeffizienten).

Gegenüber der sich so bietenden Möglichkeit stündlich bis zu 10 verschiedene Größen zu messen, wurde die Verlängerung der Meßdauer auf mehr als 6 Minuten zurückgestellt. Das Gerät wurde aber so gebaut, daß in Einzelfällen auch längere Meßdauern möglich sind.

Für die untere Begrenzung wurde die Zeit von 240 ms gewählt. Diese Zeit wird aus der Netzfrequenz gewonnen. Die Zeit von 240 ms hat den Vorteil, daß sich die Digitalisierung der Meßwerte noch verhältnismäßig einfach durchführen läßt und außerdem bei diesem Zeittakt sich auch noch leicht Drehwähler und Relais (s.u.) einsetzen lassen.

An dieser Stelle sei auf eine prinzipielle Schwierigkeit bei der Messung von Schwankungsgrößen meteorologischer Parameter hingewiesen. Die Beobachtung eines weiten Spektralbereiches erfordert auch dann, wenn man sich auf einfache Größen wie Streuung und Kovarianz beschränkt, einen großen elektronischen Aufwand. Außerdem ist es dann unmöglich, schnellere Änderungen dieser Größen zu verfolgen, wie sie gerade im Bereich kleiner Turbulenzelemente, d.h. bei hohen Frequenzen, möglich sind.

Als Beispiel für einen solchen Fall soll hier die Analogregistrierung der Lufttemperatur in 0,5 m Höhe, Abbildung 6, erläutert werden. Registriert wurde die Widerstandsänderung eines frei gespannten Pt-Drahtes von 20 μ Durchmesser mit einem Multiflex-Galvanometer MG 1 (Fa. Lange) mit zusätzlichem Nachlaufschreiber.

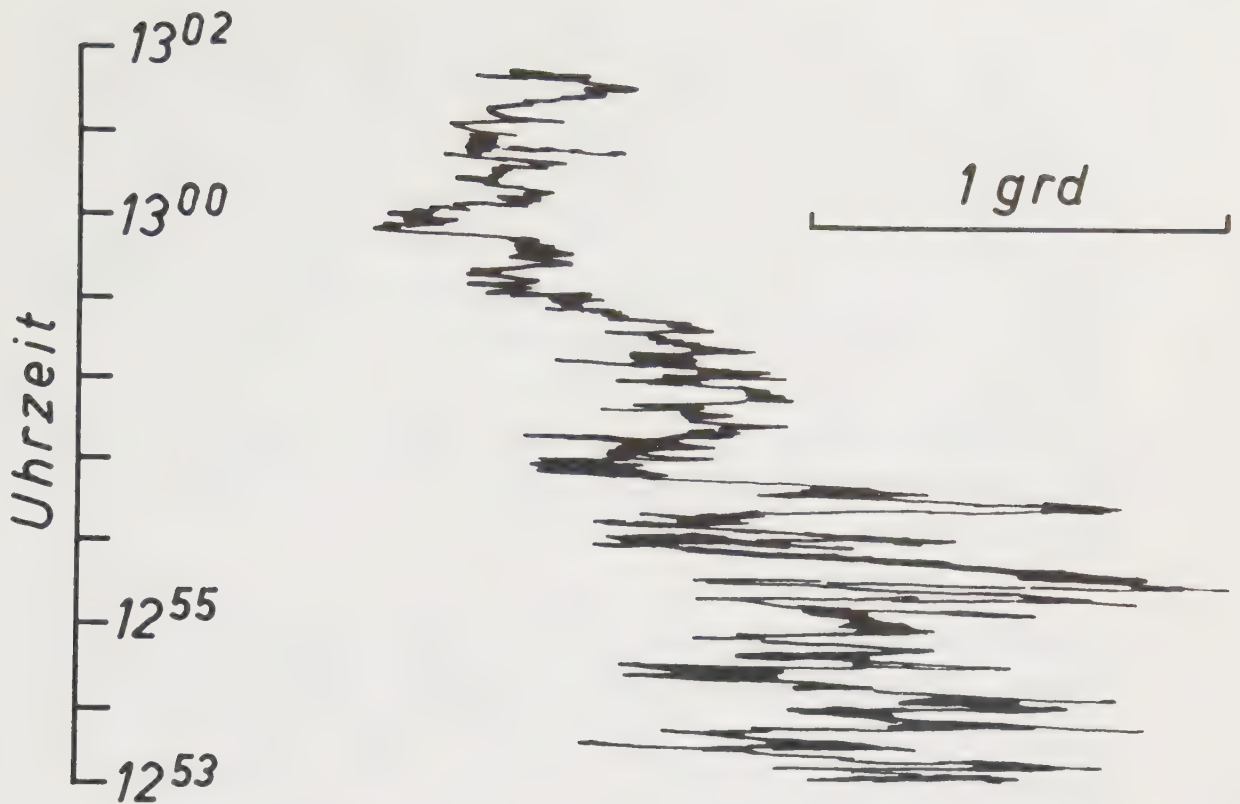


Abbildung 6: Ausschnitt aus einer Feinstrukturregistrierung der Lufttemperatur in 0,5 m Höhe.

Die Registrierung umfaßt den Zeitraum von 12⁵³ bis 13⁰⁷ am 8.7.1961. In 2 m Höhe herrschte bei einer Lufttemperatur von 20°C Westwind mit 2 m/s Geschwindigkeit. Der Himmel war zu 6/8 mit Cumulus bedeckt. Zu Beginn des Ausschnittes aus der Registrierung sieht man, daß die Lufttemperatur um rund 1 grd schwankt. Nach 4 Minuten ändert sich das Bild des Temperaturverlaufes in Bezug auf die Schwankungen grundlegend. Die Schwankungen haben jetzt nur noch eine Amplitude, die weniger als die Hälfte derjenigen in den ersten Minuten beträgt. Die Änderung der Struktur fällt etwa mit der Abschattung des Meßplatzes durch einen Cumulus zusammen.

Werden Schwankungsgrößen aus Meßperioden, die sich über 1 bis 2 Stunden erstrecken, berechnet, lassen sich also kurzfristige Änderungen im kurzwelligen Bereich des Turbulenzspektrums nicht mehr erfassen. Außerdem wirkt sich bei einer Meßperiode von 1 bis 2 Stunden schon der Tagesgang der meteorologischen Elemente aus, so daß eine Trendbereinigung unbedingt erforderlich wäre. Das bedeutet zusätzlichen Rechenaufwand, wenn man nicht die Schwankungen in Bezug auf einen trägen Meßfühler mißt, dessen Trägheit dann wieder das Frequenzintervall zu tiefen Frequenzen hin beschränkt. Weiterhin vollzieht sich zur Zeit von Sonnenauf- und Untergang die meteorologisch sehr interessante Änderung des Temperaturprofiles vom labilen zum stabilen Profil, bzw. umgekehrt, etwa in einer Stunde, wenn man die untersten 50 m der Atmosphäre betrachtet. Eine Beobachtungsdauer über eine so lange Zeit ist also gelegentlich von Nachteil.

Für Spezialuntersuchungen ist es mit Hilfe der an der meteorologischen Station am Forschungsreaktor München digital im Abstand von 6 Minuten gemessenen Werte möglich,

auch den langwelligen Anteil des Spektrums zu erfassen. Die sich aus den 6 Minuten ergebende Filterkurve ist ebenfalls in Abbildung 5 eingezeichnet. Wie man sieht, schließt der von den 6 Minuten - Werten erfaßte Bereich praktisch lückenlos an den an, der mit dem hier beschriebenen Gerät überdeckt wird.

3. DIE BESCHREIBUNG DES GERÄTES. =====

Das Gerät soll in Zusammenarbeit mit der vorhandenen Anlage in Garching [12] die Streuung und die Kovarianz μ von zwei Meßwertreihen alle 6 Minuten digital berechnen.

3.1.) Die Rechenoperationen.

Betrachten wir zunächst die Rechenarbeit, die hierzu ausgeführt werden muß. Dazu formt man zweckmäßigerweise Streuung und Kovarianz in eine Form um, die das maschinelle Rechnen erleichtert. Aus

$$\mu_{x,y} = \overline{\dot{x}\dot{y}} = \frac{1}{n} \sum_1^n \dot{x}_i \dot{y}_i \quad (3.1.1)$$

folgt mit

$$\dot{x}_i = x_i - \bar{x} \quad , \quad \dot{y}_i = y_i - \bar{y}_i \quad (3.1.2 a, b)$$

sowie

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_1^n x_i \quad , \quad \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_1^n y_i \quad (3.1.3 a, b)$$

$$n^2 \mu_{x,y} = n \sum_1^n x_i y_i - \sum_1^n x_i \cdot \sum_1^n y_i \quad . \quad (3.1.4)$$

In analoger Weise ergibt sich aus

$$\sigma_x = \sqrt{\bar{x}^2} \quad , \quad \sigma_y = \sqrt{\bar{y}^2} \quad (3.1.5 \text{ a,b})$$

$$n^2 \sigma_x^2 = n \sum_1^n x_i^2 - \left(\sum_1^n x_i \right)^2 \quad , \quad n^2 \sigma_y^2 = n \sum_1^n y_i^2 - \left(\sum_1^n y_i \right)^2 \quad (3.1.6 \text{ a,b})$$

Berechnet man nun nicht die zunächst gesuchten Größen σ_x , σ_y und $\mu_{x,y}$ sondern $n^2 \sigma_x^2$, $n^2 \sigma_y^2$ und $n^2 \mu_{x,y}^2$, so sind zu dieser Berechnung nur Additionen und Multiplikationen nötig. Diese lassen sich vergleichsweise einfach ausführen.

3.2) Der Programmablauf während einer Meßperiode.

Aus diesen Überlegungen ergeben sich schon wesentliche Punkte des Programmes. Aus den primären Meßwertreihen

x_i, y_i werden zunächst die Werte $x_i^2, y_i^2, x_i y_i$ gebildet. Aus diesen 5 Werten

$$x_i, y_i, x_i^2, y_i^2, x_i y_i \quad (3.2.1)$$

werden durch fortlaufendes Summieren in n Schritten

$$\sum_1^n x_i, \sum_1^n y_i, \sum_1^n x_i^2, \sum_1^n y_i^2, \sum_1^n x_i y_i \quad (3.2.2)$$

gebildet. In einer abschließenden Rechnung werden dann nach (3.1.6) bzw. (3.1.4) $n^2 \sigma_x^2, n^2 \sigma_y^2$ und $n^2 \mu_{x,y}^2$ ermittelt. Diese Werte stehen zum Herausschreiben zur Verfügung. Aus technischen Gründen beginnt das Programm mit der Ausgabe des Ergebnisses des vorhergehenden Meßintervalles.

Zu diesen Programmpunkten kommt noch ein weiterer, dessen Notwendigkeit eine Zwischenüberlegung zeigen soll. Die kurzfristigen Schwankungen der Lufttemperatur sind im Vergleich zur Tages- und Jahresamplitude nur klein.

Um eine genügend große Auflösung zu erhalten, muß man die Meßbrücke, in der das Pt-Draht-Thermometer (s.u.) liegt, vor jeder Messung abgleichen. Zu diesem Zweck wird die Anordnung im Verhältnis 10 : 1 unempfindlicher gemacht und in einer Vormessung der Mittelwert der Lufttemperatur über 15 s, was 64 Einzelmessungen entspricht, berechnet. Diese Rechnung ist nötig, da eine einmalige Ablesung des Meßwertes bei dem trägheitsarmen Meßfühler zu sehr von einem zufälligen Momentanwert beeinflusst sein könnte, der sich als Bezugspunkt für eine 6-min Messung keineswegs eignet.

Das Herausschreiben des Ergebnisses wird extern von der Anlage in Garching alle 6 Minuten angesteuert. Dieser Befehl bewirkt gleichzeitig den Beginn eines neuen Zyklus, dessen wesentliche Programmteile somit in zeitlicher Reihenfolge lauten:

- 1.) Herausschreiben des Ergebnisses
- 2.) Abgleichen der Meßbrücke
- 3.) Messen und Bilden der Werte nach (3.2.1.) und (3.2.2.)
- 4.) Abschließende Berechnungen entsprechend (3.1.6a,b) und (3.1.4)
- 1.) Herausschreiben des Ergebnisses

Alle Programmpunkte werden bis auf den Einsatz von 1.) intern von dem Gerät gesteuert. Die Programmteile 1.)-4.) enthalten eine ganze Reihe von Einzelbefehlen, die, soweit es zum Verständnis des Gerätes notwendig ist, später erläutert werden.

3.3) Die verwendeten Zahlensysteme.

Da die Ausgabe der Daten digital erfolgen muß und sich die Rechenoperationen auch leichter digital durchführen lassen, ist ein wesentlicher Teil des Gerätes ein Analog-Digital-Umsetzer. Dieser wurde von H. Karstensen [14] gebaut und beschrieben. Das Gerät arbeitet nach dem Verfahren der Skalenstreckenumsetzung und liefert am Ausgang alle 240 ms zwei 6-stellige Binärzahlen auf 12 parallelen Ausgängen. Der Modus der Zahlen ist rein binär. Die Weiterverarbeitung der Daten erfolgt ebenfalls rein binär.

Die Datenausgabe (Programmpunkt 1.) erfolgt oktal (8 Parallelausgänge), wodurch die aufwendige Umwandlung von reinen Binärzahlen in das dekadische System eingespart wird.

3.4) Bauteile des Gerätes.

Die Abwicklung des Programms und die Durchführung der Rechnungen ist im wesentlichen mit Drehwählern, Relais, Transistoren und Dioden gelöst, die in Schaltungen mit Widerständen und Kondensatoren verknüpft sind.

Die technische Ausführung des Gerätes läßt sich am besten beschreiben, wenn man von den Bauelementen und ihrer Funktionsweise ausgeht. Es folgen dann Baugruppen und am Schluß ein Funktionsplan, der aus den bereits vorher beschriebenen Baugruppen aufgebaut wird und damit überschaubar ist. Viele Einzelprobleme, die bei dem Bau des Gerätes viel Aufwand erforderten, treten dabei in den Hintergrund. Ebenso werden keine technischen Details erläutert, die zwar bei der Konstruktion berücksichtigt werden mußten, die aber bei einer Beschreibung des Gerätes das Gesamtbild nur verwirren würden.

Detailbeschreibungen sind erst wieder dann nötig, wenn es sich um Teile handelt, die das Meßergebnis beeinflussen (Meßfühler, Auslegung der Brücke und prinzipielle Fragen im Zusammenhang mit der Digitalisierung der Meßwerte). Diese Fragen werden zum Schluß dieses Kapitels erläutert und bilden damit gleichzeitig den Übergang zum letzten Kapitel, das einige Meßergebnisse beschreibt.

Der Drehwähler.

Der Drehwähler ist ein Schrittschaltwerk, das für verschiedene Schrittzahlen im Handel ist. Im Gerät sind Drehwähler mit 12 und 52 Schaltstellungen eingebaut, die beide 5 von einander getrennte Bahnen besitzen. Für eine Bahn soll eine Skizze, Abbildung 7, die Funktionsweise des Schrittschaltwerkes im Prinzip erläutern.

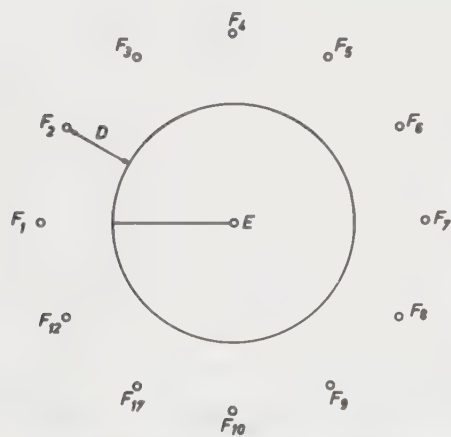


Abb. 7: Funktion eines Drehwählers (schematisch)

Der Doppelpfeil D, der sich jedesmal, wenn der Wähler mit einem Stromimpuls angesteuert wird, auf die nächste der Fahnen, $F_1 - F_{12}$, bewegt, stellt je nach der Stellung zwischen E und der betreffenden Fahne eine leitende Verbindung her. Es ist nur eine Drehrichtung möglich und es können keine Fahnen übersprungen werden.

Der Wähler wird elektromagnetisch durch eine Spule, deren Anker den Schaltstern (in der Skizze mit Doppelpfeil D bezeichnet) mechanisch in die nächste Stellung bringt, angetrieben. Dort bleibt der Schaltstern auch dann, wenn der Stromimpuls, der den Schaltvorgang bewirkte, beendet ist.

Drehwähler eignen sich besonders zum Abwickeln von langsamen Programmen (Taktfolgefrequenz bis zu 20 Hz.), die fest am Wähler verdrahtet werden. Eine Änderung des Programmes ist durch Hilfsschaltungen beschränkt möglich.

Das Relais.

Das Relais ist ebenfalls ein Bauelement, das durch eine Mechanik, die elektromagnetisch durch eine Spule mit Anker bewegt wird, Kontakte öffnet oder schließt. Relais sind in großer Typenmannigfaltigkeit im Handel. Beim Rechnen mit 6-stelligen Binärzahlen erweisen sich besonders Relais mit 6 Kontaktsystemen als vorteilhaft. Bei allen eingebauten Relais bleibt das Relais nur solange in Arbeitsstellung, wie die Spule durch einen Strom erregt ist. Soll ein Relais nach einem kurzen Einschaltimpuls in Arbeitsstellung bleiben, so muß eine Hilfsschaltung angewandt werden.

Verdrahtet man die Kontaktsätze von mehreren Relais untereinander, so lassen sich mit diesen Kontaktfeldern auch komplizierte Ein- und Ausschalt- sowie Weichenprobleme lösen.

Halbleiterbauelemente.

Auf diese Bauelemente soll an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden. Es sei auf G. Haas [11] und, was einzelne Schaltungen betrifft, auch auf H. Karstensen [14] und die umfangreiche Spezialliteratur verwiesen. Mit Transistoren sind im Gerät alle Verstärkerschaltungen ausgeführt, die Ausgänge von Transistorschaltungen mit Spulen (Wähler und Relais) verbinden. Diese Transistorschaltungen sind größtenteils Bausteine der Fa. Valvo [26], die fertig verdrahtete Schaltungen wie Diodengatter, Multivibratoren (bistabil, mono- und astabil), Impulsformer (Schmitt-Trigger) und Verstärker- und Trennstufen enthalten.

3.5) Baugruppen und spezielle technische Probleme.

Mit bistabilen Multivibratoren lassen sich Binäruntersetzer und Schieberegister aufbauen, die zusammen mit Kontaktfeldern die Basis für das digitale Rechnen in dem Gerät bilden.

Binäruntersetzer und Schieberegister.

Das Verhalten eines Binäruntersetzers und eines Schieberegisters soll durch Gegenüberstellung kurz anschaulich gemacht werden, während der innere Aufbau der Multi-

vibratorstufen hier von geringerem Interesse ist.
(Abb. 8)

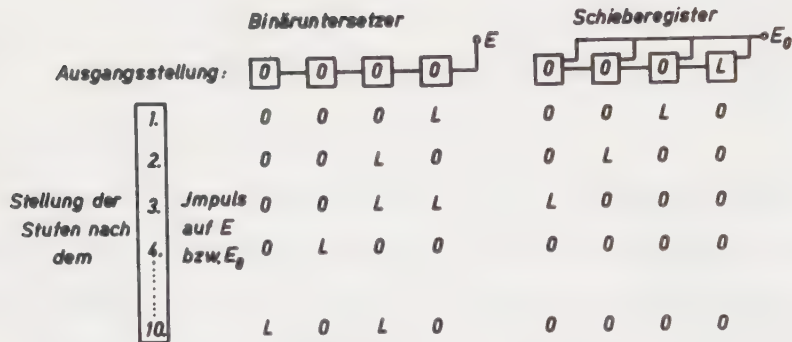


Abb. 8: Die Funktion eines Binäruntersetzers und eines Schieberegisters (schematisch).

Der Binäruntersetzter enthält nach n Eingangsimpulsen, die auf die erste Stufe wirken, die Zahl n in rein binärer Form, wenn zum Beginn alle Stufen in der Stellung 0 waren. Bei entsprechender Schaltung ist es möglich, Eingangsimpulse in jede Stufe einzuspeisen. So erhält ein Impuls, der z.B. in die 3. (6.) Stufe eingespeist wird, vom Gesamtzähler aus betrachtet die Wertigkeit 4 (32)

Beim Schieberegister wirkt ein "Schiebeimpuls" (in der Skizze E₀) auf alle Stufen so, daß der Inhalt des Schieberegisters um eine Stufe verschoben wird. Je nach Schaltung ist Vorwärts- und Rückwärtsschieben oder auch beides je nach Ansteuerung möglich. Der Inhalt, der geschoben wird, muß vorher eingelesen werden. Enthält nur die erste Stufe ein L (vergl. Skizze), so kann das Schieberegister wie ein schneller Wähler eingesetzt werden. Valvo-Bausteine der Typenreihe B 8 900 00 erlauben Taktfolgefrequenzen bis zu 100 kHz.

In dem Gerät sind Binäruntersetzer zum Addieren und Schieberegister in Verbindung mit einer Multiplizier-Matrix zum Multiplizieren eingesetzt.

Die Multipliziermatrix,

Im Gerät müssen während der Messung das Produkt und die Quadrate von zwei 6-stelligen Binärzahlen gebildet und in die entsprechenden Speicher addiert werden. Diese Aufgabe wird mit einem Kontaktfeld, weiterhin als Multipliziermatrix bezeichnet, gelöst.

Für zwei 2-stellige Binärzahlen wird das Prinzip in einer Skizze, Abbildung 9, erklärt.

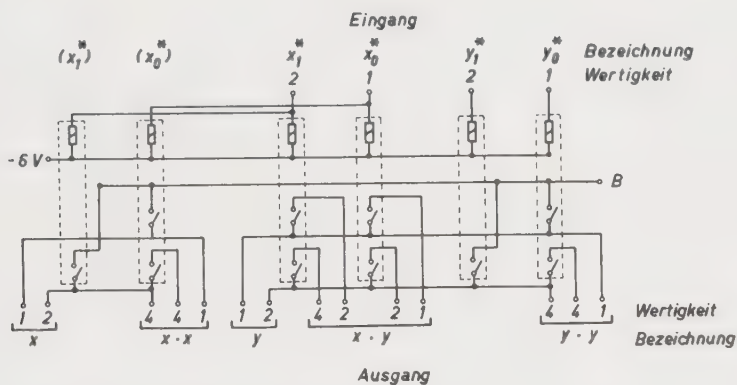


Abb. 9: Skizze einer Multipliziermatrix zur Bildung von x^2, y^2 und $x \cdot y$ für zwei 2-stellige Binärzahlen x und y .

Die Bezeichnungsweise des Eingang ist so gewählt, daß der Index die Hochzahl zur Basis 2 angibt. Bei dieser Schreibweise muß der ersten Stufe die Null zugeordnet werden. Die Relaiskontakte sind in Ruhelage eingezeichnet. Wird an eine Relaispule Spannung gelegt, was dem Wert 1 entsprechen soll, werden die Kontakte des entsprechenden Relais geschlossen. Die Spulen und die dazugehörigen Kontaktsysteme sind durch gestrichelte Linien zusammengefaßt.

Das Potential, das einem besetzten Ausgang zugeordnet sein soll, liegt an B . Wenn kein Relais angezogen ist, liegt das Potential von B auf keinem der Ausgänge, was dem Wert Null auf jedem Ausgang entspricht.

An einem Beispiel, $x = LO = 2$ und $y = LL = 3$, soll die Funktionsweise der Matrix kurz gezeigt werden. Diese Werte für x und y bewirken, daß die Relais $(x_1^*), x_2^*, y_0^*$ und y_1^* angezogen sind.

Über ihre Kontakte wird das Potential B auf die Ausgänge gelegt. Im vorliegenden Beispiel ist in der Reihenfolge der Abb. 9

$x: 0,2 \quad xx: 4,0,0 \quad y: 1,2 \quad xy: 4,2,0,0 \quad yy: 4,4,1$

wobei 0 bedeutet, daß diese Stelle nicht mit B verbunden ist. Addiert man die zusammengehörigen Werte, so erhält man

$$x = 2, \quad x^2 = 4, \quad x \cdot y = 6, \quad y^2 = 9, \quad y = 3$$

was die gestellte Aufgabe richtig löst.

Da ein transistorisierter Binäruntersetzer wegen des Prellens der Relaiskontakte nicht direkt von Relais angesteuert werden darf und weil außerdem ein solcher Zähler nicht in mehreren Stufen gleichzeitig angesteuert werden kann, ist es notwendig, die Matrixausgänge einzeln abzufragen. Maximal treten bei einer Matrix für 6-stellige Binärzahlen 36 Ausgänge auf. Bei den Matrizen, die die Quadrate bilden, kann diese Anzahl durch Zuordnung anderer Wertigkeiten, wie dies auch schon in der Abbildung 9 geschehen ist, etwas reduziert werden.

Die Ausgänge der Multipliziermatrix werden mit einem Schieberegister (Taktfolgefrequenz 30 kHz) abgefragt. Da dies erst mit einer kleinen Zeitverzögerung nach dem Ansteuern der Relais geschieht, sind die Kontakte sicher offen oder geschlossen. Technisch geht das Abfragen so vor sich, daß jeder Ausgang der Matrix auf je ein Und-Gatter mit drei Eingängen wirkt. Der zweite Eingang wird von einem Multivibrator des Schieberegisters gesteuert und an dem dritten liegt der Zählimpuls für den Zähler. Müssen mehrere gleichwertige Matrixausgänge an der gleichen Stelle eines Zählers eingespeist werden, so werden diese nach dem Und-Gatter durch ein Oder-Gatter zusammengefaßt.

Bei der weiteren Beschreibung wird das Kontaktfeld der Matrix zusammen mit den Relaispulen, den dazugehörigen Leistungsverstärkern und den Gatterkombinationen am Ausgang der Matrix samt dem Schieberegister als Multipliziermatrix bezeichnet. Dieser Begriff soll außerdem noch die dem Gattern nachgeordneten Verstärker enthalten, die die Impulse so formen, daß die Zählerstufen damit angesteuert werden können. Diese Verstärker bilden den Ausgang der mit Multipliziermatrix bezeichneten Baugruppe, die Leistungsstärker für die Relaispulen den Eingang.

Die abschließenden Rechnungen.

In der oben skizzierten Weise werden also alle 240 ms die Größen x_i , y_i , x_i^2 , y_i^2 und $x_i y_i$ gebildet

und in 5 Binärzähler eingespeist. Nach 1024 Schritten stehen in diesen Zählern dann binär die Summen

$$\sum_1^{1024} x_i, \quad \sum_1^{1024} y_i, \quad \sum_1^{1024} x_i^2, \quad \sum_1^{1024} y_i^2, \quad \sum_1^{1024} x_i y_i$$

Diese werden in der abschließenden Rechnung nach (3.1.6 a,b) und (3.1.4) verarbeitet. Dabei werden die Ausdrücke von der Art

$$\sum_1^{1024} x_i \cdot \sum_1^{1024} y_i$$

ebenfalls mit der oben beschriebenen Relaismatrix gebildet, indem immer 6 Stellen von den Zählern $\sum_1^{1024} x_i$ bzw. $\sum_1^{1024} y_i$ abgelesen und damit die Relais der Matrix betrieben werden. Da sich bei diesem Verfahren auch die Wertigkeit der Matrixausgänge ändert, wird durch ein Kontaktfeld dafür gesorgt, daß die Einspeisung stellenrichtig geschieht.

Bei der Bildung der Produkte mit n nach (3.1.6 a,b) bzw. (3.1.4) muß lediglich die Wertigkeit der einzelnen Binärstellen von $\sum_1^{1024} x_i^2, \sum_1^{1024} x_i y_i, \sum_1^{1024} y_i^2$ verändert werden, da $1024 = 2^{10}$ ist.

Die abschließende Subtraktion nach (3.1.6 a,b) bzw. (3.1.4) wird, da die Binärzähler für die Werte nach (3.2.2) nur Additionen zulassen, mit Hilfe der um 1 vermehrten inversen Binärzahl des zweiten Faktors des Subtrahenden in den Gleichungen nach (3.1.6 a,b) bzw. (3.1.4) bewirkt. Ein vereinfachtes Beispiel soll dies veranschaulichen.

Die Gleichung

$$7 - 3 \cdot 2 = 1$$

lautet in vierstellig binärer Schreibweise

$$0111 - 0011 \cdot 0010 = 0001$$

Ersetzt man hier den zweiten Faktor des Subtrahenden durch seinen um 1 vermehrten inversen Wert, also OOLO durch LLOL + L = LLL0, so hat das Produkt den Wert

$$OOLL \cdot LLL0 = OLOLOLO$$

bzw., wenn man nur die 4 letzten Stellen berücksichtigt, den Wert LOLO. Diese ergeben zu OLLL addiert

$$OLLL + LOLO = L000L ,$$

in den letzten 4 Stellen also 000L.

Wie man sich überlegen kann, läßt sich das Verfahren auch anwenden, wenn die Subtraktion ein negatives Ergebnis liefert. Vorzeichenindikator ist die Stelle vor der höchsten möglichen Ergebnisstelle, im Beispiel die fünfte Stelle von rechts, und das Ergebnis erscheint in inverser Schreibweise.

3.6.) Der Funktionsplan.

Mit Hilfe der Baugruppen kann jetzt ein Funktionsplan des gesamten Gerätes, Abbildung 10, gezeichnet und beschrieben werden. Die einzelnen Baugruppen sind untereinander mit Linien verbunden, deren Pfeile andeuten, in welcher Richtung die Beeinflussung geschieht. Für den Programmteil P sind nur Pfeile zum Programm gezeichnet, die entgegengesetzten sind aus Gründen der besseren Übersicht weggelassen. Der Programmteil P wirkt auf alle Teile mit Ausnahme der Meßfühler F, der Galvanometer G, des Ablesegerätes A und des Tonbandspeichers T. Ebenso wirkt der externe Einschaltimpuls E nur in Richtung auf P.

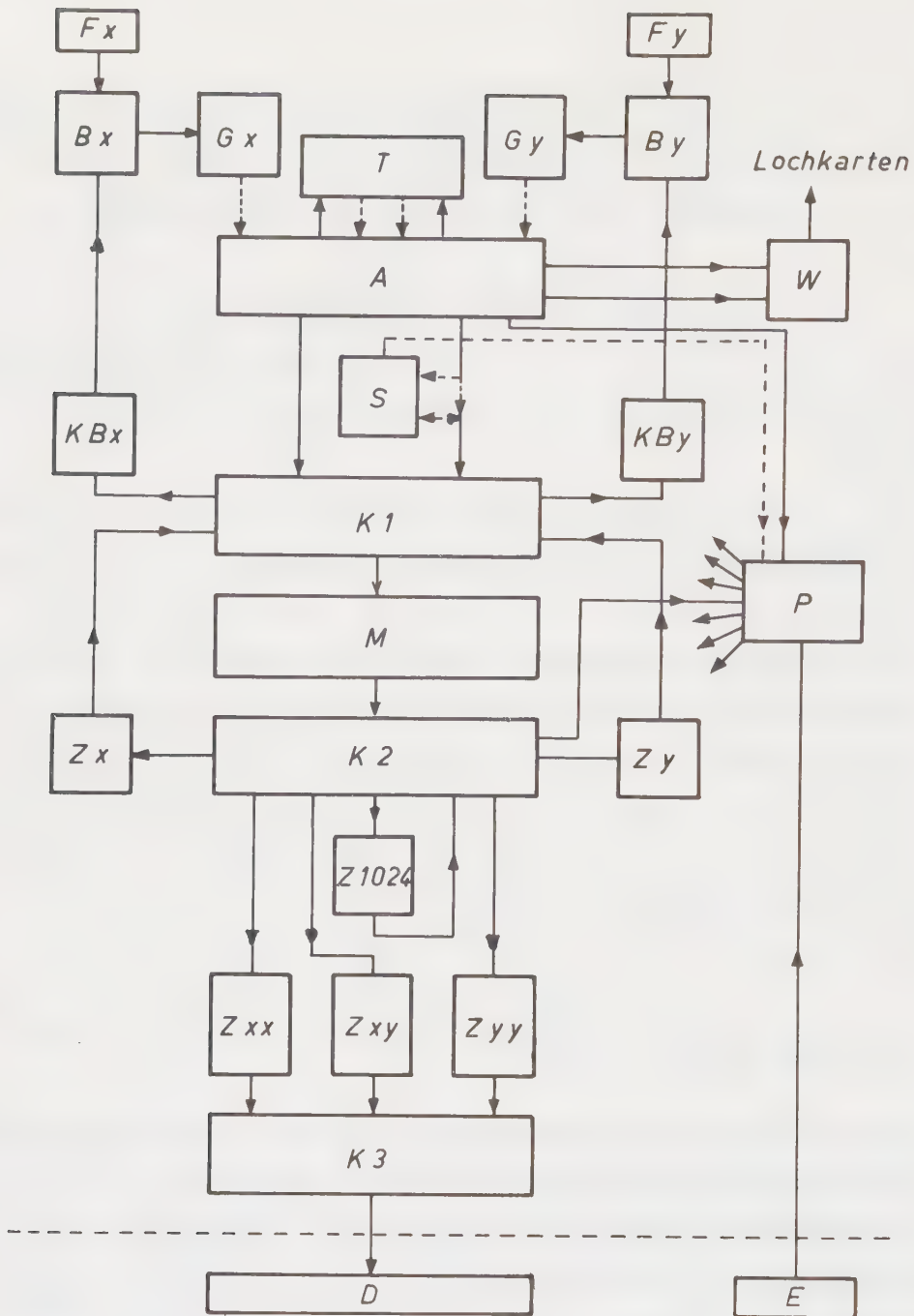


Abbildung 10: Der Funktionsplan des Gerätes. Legende:
 A = Ablesegerät, B = Meßbrücke, D = Digitales Registrier-
 gerät, E = externer Einschaltimpuls, F = Meßfühler,
 G = Galvanometer, K = Kontaktfeld, M = Multipliziermatrix,
 P = Programm, S = Speicher, T = Tonbandspeicher, W = Ge-
 rät in Entwicklung, Z = Binärzähler. Nähere Erläuterungen
 im Text.

Ablesegerät A und Tonbandspeicher T sind bei H. Karstensen [14] beschrieben. Zum Verständnis des Funktionsplanes genügt es, wenn man weiß, daß das Ablesegerät als Analog-Digitalumsetzer arbeitet und je nach der gewählten Betriebsweise die Datenpaare x_i , y_i von den Galvanometern oder von einem Tonband abliest. Die Linien sind gestrichelt gezeichnet, um dadurch anzuzeigen, daß entweder die eine oder die andere Betriebsart möglich ist.

Die kontinuierliche Berechnung der Streuungen σ und der Kovarianz μ .

Die Beschreibung beginnt am besten mit dem externen Einschaltimpuls E, der den Start des Programmes bewirkt. Während des Programmablaufes ist eine Beeinflussung von P durch E schaltungstechnisch ausgeschlossen.

Nach dem Start wird von P K3 angesteuert und dadurch im Zeitabstand von 240 ms je 12 Zählerstufen der Zähler Zxx, Zxy und Zyy in Dreiergruppen abgelesen und oktalt in das digitale Registriergerät D eingespeist. Nachdem so das Meßergebnis der vorangehenden Messung herausgeschrieben ist, werden durch P alle Zähler und die Einstellung von KBx und KBy gelöscht.

Für den jetzt folgenden Vorabgleich der Meßbrücken werden die Galvanometer Gx und Gy im Verhältnis 10 : 1 unempfindlicher gemacht. Nach einer Wartezeit von ca. 3 Sekunden werden gleichzeitig über K1 die Werte x und y in die Matrix M eingesteuert und über K2 der Ausgang

der Matrix an die Zähler Z_x und Z_y und der Zählimpuls auf Z_{1024} gelegt. Über K_2 wird außerdem der Ausgang der 6. Stufe des letztgenannten Zählers mit P verbunden. Dadurch wird nach 64 Einzelmessungen ein Impuls an P geliefert, der die nächsten Programmpunkte einleitet. Zunächst werden die Verbindungen zwischen A und M (über K_1) und M und den Zählern Z_x , Z_y , und Z_{1024} (über K_2) getrennt. Dann werden über K_1 die Meßbrücken durch K_{Bx} und K_{By} entsprechend dem Inhalt der Stufen 7 - 12 (Mittelung über 64 Messungen) der Zähler Z_x und Z_y eingestellt. Die Meßbrücken B_x und B_y sind damit abgeglichen.

Es folgen jetzt die Vorbereitungen für die eigentliche Messung. Alle Zähler werden gelöscht und die Empfindlichkeit der Galvanometer G_x und G_y wird durch P über K_{Bx} und K_{By} wieder auf 1:1 geschaltet. Dann wird nach einer Wartezeit von ca. 3 Sekunden gleichzeitig A über K_1 mit M und M über K_2 mit allen Zählern verbunden und der Ausgang der 10. Zählstufe von Z_{1024} über K_2 an P gelegt.

Während der nächsten 1024 240 ms - Zeittakte werden die 1024 Wertpaare x_i und y_i gewonnen und in der oben beschriebenen Weise verarbeitet.

Die abschließenden Berechnungen nach (3.1.6 a,b) und (3.1.4) werden durch den Impuls der 10. Zählstufe des Zählers Z_{1024} , der auf P wirkt, eingeleitet. Zunächst trennen die Kontaktfelder K_1 und K_2 die Matrix M von dem Ablesegerät A und allen Zählern. Dann wird der Inhalt bzw.

der inverse Inhalt der Zähler Z_x und Z_y in Gruppen zu je 6 Zählstufen über K_1 an M gelegt, während M über K_2 mit einem der Zähler Z_{xx} , Z_{xy} oder Z_{yy} , der durch Hinzufügung von Z_{1024} (über K_2) erweitert wurde (Multiplikation mit n), verbunden wird. Von P aus werden während der ganzen abschließenden Berechnungen K_1 und K_2 so gesteuert, daß die Produkte von der Art $\sum x \cdot (\sum y)_{inv.}$ Schritt für Schritt gebildet und stellengerichtig in die Zähler von der Art $n \sum x \cdot y$ addiert werden. Wenn dann noch, entsprechend dem oben beschriebenen Beispiel, $\sum x$ bzw. $\sum y$ in Gruppen zu je 6 Binärziffern addiert wurde, ist das Programm beendet und das Ergebnis von Messung und Rechnung kann bei dem nächsten Start des Programmes von den Zählern Z_{xx} , Z_{xy} und Z_{yy} abgerufen werden. Damit hat sich der Programmzyklus geschlossen.

Die Berechnung von Autokorrelationskoeffizienten.

Für die Untersuchung von Autokorrelationskoeffizienten wird ein Speichergerät S zwischen A und K_1 in die Verbindung x oder y geschaltet. Dieses Gerät wirkt so, daß der am Eingang von S auftretende Wert x_i bzw. y_i erst nach einer Zeit $m \cdot 0,24$ s, $1 \leq m \leq 156$, wieder am Ausgang von S erscheint. Die Werte werden digital in einem mit Kondensatoren aufgebauten Speicher (Kapazität 936 bit) gespeichert. Das Einlesen und Abfragen wird von zwei 52-teiligen Wählern in Verbindung mit 156 Kammrelais besorgt.

Das Programm P wird durch S so beeinflusst, daß in der Meßphase erst dann mit den Rechnungen begonnen wird, wenn der erste Wert am Ausgang des Speichers bereitsteht. Bei dem Betrieb der Anlage ohne den Speicher S wird diese Wirkung von S auf P durch einen Schalter imitiert.

Berechnet man aus den auf Tonband gespeicherten Meßdaten eines 6 - Minutenintervalles Autokorrelationskoeffizienten mit verschiedener Zeitverschiebung, kann man die Autokorrelationsfunktion gewinnen. In diesem Fall entnimmt das Ablesegerät die Daten dem Tonband.

In Planung befindet sich ein Gerät W , das die Übertragung von Meßdaten vom Tonband auf Lochkarten ermöglichen soll. Für meteorologisch interessante Situationen könnten dann die Meßdaten noch eingehender bearbeitet werden.

3.7) Schlußbemerkungen zum technischen Teil.

Einschließlich der Netzgeräte wurden in das gesamte Gerät unter anderem folgende Bauteile eingebaut:

228	Flipflops (Valvo-Bausteine)
146	sonstige Valvo-Bausteine
493	Transistoren verschiedenster Typen
1200	Dioden
1640	Widerstände
1033	Kondensatoren
348	Relais
7	Drehwähler
130	Photowiderstände.

Wie sich diese Bauelemente auf die wichtigsten Baugruppen (siehe Funktionsplan) verteilen, ist in der Tabelle 1 zusammengestellt.

Bauelemente	Baugruppen											Zxx Zxy Zyy	
	A	B	K1	K2	K3	KBx	KBy	M	P	S	T	Z1o24	Zx Zy
Relais	18	2	18	38	12	8	8	18	30	168	17	-	-
Drehwähler	-	-	-	-	-	-	-	-	4	2	-	-	-
Flipflops	-	-	-	-	-	-	-	40	4	-	38	10	32
Transistoren	160	-	-	-	-	-	-	180	20	30	85	-	-
Dioden	285	2	18	38	12	8	8	116	50	170	217	20	64
Widerstände	416	40	-	-	-	-	-	400	60	40	268	10	32
Kondensatoren	27	-	-	-	-	-	-	-	15	912	21	-	-

- 37 -

Tabelle 1: Die Verteilung verschiedener Bauelemente auf die Baugruppen des Funktionsplanes.

Dieser Tabelle wäre noch hinzuzufügen, daß das Programm 194 Wählerschritte umfaßt und daß jeder 240 ms-Zeittakt durch eine Zählhaltung in 24 Intervalle unterteilt ist. Damit kann die zeitliche Reihenfolge von verschiedenen Funktionen innerhalb eines Zeittaktes geregelt werden. Der Zeittakt selbst wird aus der Netzfrequenz gewonnen. Werden Daten vom Tonband abgelesen, sorgt ein Synchronisierungsimpuls vor jedem Wertepaar x_i, y_i für den Gleichlauf von Tonband und der übrigen Anlage.

4. DISKUSSION DER MESS - UND RECHENFEHLER .

=====

Bevor einige Meßwerte diskutiert werden, sollen die Meß- und Rechenfehler der hier beschriebenen Anlage besprochen werden. Da bisher nur Schwankungen der Lufttemperatur gemessen werden, beschränkt sich die Diskussion der Meßfehler auf den zur Zeit eingesetzten Temperatur-Meßfühler. Die Meßfehler anderer Meßfühler, die später zusammen mit dem hier beschriebenen Gerät eingesetzt werden sollen und die sich zur Zeit am Meteorologischen Institut der Universität München in Entwicklung befinden, werden zusammen mit diesen Meßfühlern in den diesbezüglichen Arbeiten besprochen werden.

Einen Überblick über die verschiedenen Fehlerquellen soll die Abbildung 11 vermitteln. In ihr wird die

Gewinnung der statistischen Maßzahlen schematisch gezeigt. Diese Abbildung soll außerdem noch einmal darauf hinweisen, daß die zu bearbeitende meteorologische Größe nur eine Frage des Meßfühlers ist. Abweichend von der Reihenfolge der Fehler in der Abbildung 11 ist es für die Besprechung der Fehler günstiger, diejenigen Fehler an den Anfang zu stellen, die durch die Konstruktion des Gerätes bedingt sind. Diese zeigen, wie schon von der Konstruktion her die Genauigkeit begrenzt wird, und schaffen gleichzeitig eine Basis für die Beurteilung der eigentlichen Meßfehler, d.h. derjenigen Meßfehler, die am Meßfühler auftreten.

Die nachfolgende Diskussion der verschiedenen Fehler ergibt teilweise absolute Angaben (beim Temperaturmeßfühler also in grd) und teilweise relative (%). Um die Gesamtwirkung erkennen zu können, ist es notwendig, eine Umrechnung anzugeben. Dieser soll eine mittlere Streuung der Temperatur von 0,4 grd zugrunde gelegt werden, die also 100 % entspricht.

Informationslaufplan

Fehlerquellen

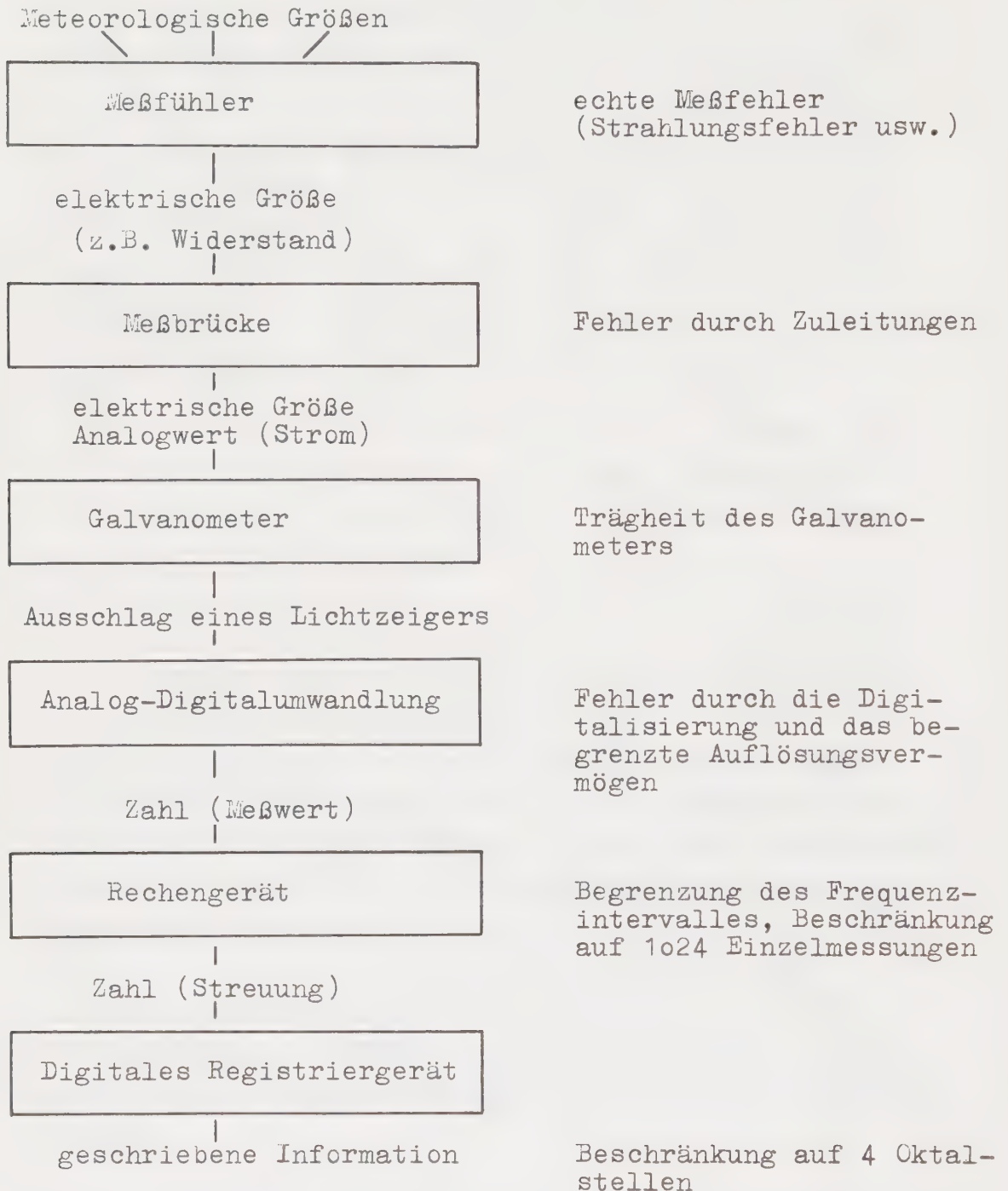


Abbildung 11 : Die Verarbeitung von meteorologischen Meßgrößen mit dem hier beschriebenen Gerät zu statistischen Maßzahlen und auftretende Fehlerquellen (schematisch).

4.1) Der Fehler infolge der begrenzten Anzahl der Meßwerte

Die statistischen Maßzahlen σ und μ werden, wie bereits oben erwähnt, aus 1024 Einzelmeßwerten gewonnen. Diese beschränkte Meßwertzahl begrenzt die Genauigkeit der errechneten Maßzahlen, wobei bei μ ein mittlerer Fehler von 3,2 %, bei σ einer von 2,2 % zu erwarten ist. Dies entspricht bei $\sigma_T = 0,4$ grad knapp 0,01 grad.

4.2) Der Fehler durch die begrenzte Auflösung und den begrenzten Meßbereich des Analog-Digital-Umwandlers.

Durch den Analog-Digital-Umwandler werden die Werte x_i in ganzzahlige Werte

$$X_i = x_i + \xi_i \quad (4.2.1)$$

verwandelt, wobei

$$-\frac{1}{2} \leq \xi_i \leq +\frac{1}{2} \quad (4.2.2)$$

ist. Wenn man aus diesen, auf ganzzahlige X_i gerundeten Werten, Streuungen und Kovarianzen berechnet, so weichen diese, von den aus den ungerundeten Werten berechneten, ab. Dieser Fehler läßt sich abschätzen.

Wenn man annimmt, daß die Analogwerte einer Normalverteilung genügen, kann man so vorgehen, daß man eine gegebene Normalverteilung mit bekannter Streuung σ^* nachträglich digitalisiert und aus den so gewonnenen Werten die Streuung σ_i^* berechnet. Zweckmäßigerweise wählt man dabei die digitale Einheit als ein ganzzahliges Vielfaches der Streuung der ungerundeten Werte. Die Differenz $\Delta\sigma_i^*$ zwischen der ursprünglichen Streuung σ^* und der aus den gerundeten Werten berechneten Streuung σ_i^* ist dann der Fehler, den man macht, wenn man aus den gerundeten Werten Streuungen berechnet. Das gleiche gilt für die Kovarianzen.

Die Wirkung der Digitalisierung auf $\mathcal{G}^*$ sieht man am leichtesten, wenn man für sehr kleine $\mathcal{G}$ zwei Extremfälle betrachtet. Im ersten Fall soll der Zentralwert der Verteilung in der Mitte eines digitalen Schrittes liegen, im zweiten Fall am Rande. Anschaulich wird sofort klar, daß diese beiden Fälle verschiedene Werte für die aus den gerundeten Werten berechnete Streuung liefern. Im ersten Fall werden die gerundeten Werte alle den gleichen Wert haben und somit ergibt sich für die Streuung Null. Im zweiten Fall können die gerundeten Werte zwei verschiedene Werte, die sich um die digitale Einheit voneinander unterscheiden, annehmen. Welcher Wert von diesen beiden angenommen wird, hängt davon ab, ob der ungerundete Wert größer oder kleiner als der Zentralwert der Verteilung ist. Für die berechnete Streuung $\mathcal{G}^*$ ergibt sich in diesem Fall 0,5.

Im allgemeinen wird der durch die Digitalisierung bewirkte Fehler zwischen diesen beiden Extremfällen liegen. Er wird daher als Mittel aus beiden Fällen unter der Annahme berechnet, daß eine Normalverteilung vorliegt, und $\mathcal{G}^* = 1,2,5,8,10,12,15,20$ digitale Einheiten beträgt. Dieser so berechnete Fehler ist in Tabelle 2 als $\Delta\mathcal{G}_1^*$ angegeben. Für sehr große Streuungen wird

$$\Delta\mathcal{G}_1^* = -0,08.$$

In diesem Fall spielt aber die Begrenzung des Meßbereiches eine wesentlich größere Rolle. Der Analog-Digital-Umwandler ist so gebaut, daß für Meßwerte 000000 oder LLLLLL gegeben wird, je nachdem ob der Wert zu groß oder zu klein ist. Liegen mehr als 8 Meßwerte außerhalb des Meßbereiches, so wird dies zusammen mit dem Ergebnis mit herausgeschrieben.

σ^*	1	2	5	8	10	12	15	20
$\Delta\sigma_1^*$	-0,26	-0,21	-0,19	-0,17	-0,15	-0,14	-0,12	-0,10
$\Delta\sigma_2^*$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,40	2,30
n	0	0	0	0	0	6	34	112
$\Delta\sigma^*$	-0,26	-0,21	-0,19	-0,17	-0,15	-0,11	-0,28	2,20
$\frac{\Delta\sigma}{\sigma} = \frac{\Delta\sigma^*}{\sigma^*}$	-26	-10,5	-3,8	-2,1	-1,5	-0,9	1,9	11,0 %

Tabelle 2: Der Fehler infolge der Digitalisierung und des begrenzten Meßbereiches. (Nähere Erläuterungen im Text).

Nimmt man an, daß der Zentralwert der Verteilung wegen der Unsicherheit bei dem Vorabgleich der Meßbrücke nicht genau in die Mitte des Meßbereiches fällt, sondern um ± 5 digitale Schritte neben der Mitte liegt, so läßt sich unter diesen Voraussetzungen der Fehler berechnen, der entsteht, wenn man die herausfallenden Werte durch 000000 bzw. LLLLLL ersetzt. Der so für eine Normalverteilung und die obigen σ^* -Werte errechnete Fehler ist als $\Delta\sigma_2^*$ in Tabelle 2 angegeben. Das in der 4. Zeile aufgeführte n gibt an, wieviele Werte dabei außerhalb des Meßbereiches liegen.

Die mit $\Delta\sigma^*$ bezeichnete Summe dieser beiden Fehler $\Delta\sigma_1^*$ und $\Delta\sigma_2^*$ ist ebenso wie der relative Fehler $\frac{\Delta\sigma^*}{\sigma^*}$ in

Tabelle 2 aufgeführt. Wie man sieht, liegt er für

$5 < \delta^* < 16$ unter 4 %. Da er außerdem systematischer Natur und δ^* bekannt ist, läßt er sich zumindest für die obigen Voraussetzungen durch eine Korrektur verkleinern. Schließlich kann man, wenn der Aufwand gerechtfertigt scheint, mit Hilfe der gespeicherten Einzelmeßwerte den Fehler noch besser erfassen und berücksichtigen. Im allgemeinen wird dies aber unnötig sein, wenn man einen Meßbereich (= 64 digitale Schritte) von 2....3 grd wählt, so daß $\delta = 0,4$ grd etwa $\delta^* = 10$ entspricht. Dann wird in den meisten Fällen eine Korrektur überhaupt unterbleiben können, da der Fehler kleiner als der nach 4.1 ist.

4.3) Fehler des Temperaturmeßfühlers.

Als Temperaturmeßfühler dient ein freigespannter Platindraht von 20 μ Durchmesser, der bei 0°C einen Widerstand von 100 Ω hat. Dieser Draht ist über zwei Nylonfäden gespannt, die von einem Kunststoffring 3 mm x 3 mm und 11 cm Durchmesser gehalten werden. Die Abbildung 12 zeigt eine maßstabgetreue Skizze dieses Meßfühlers.

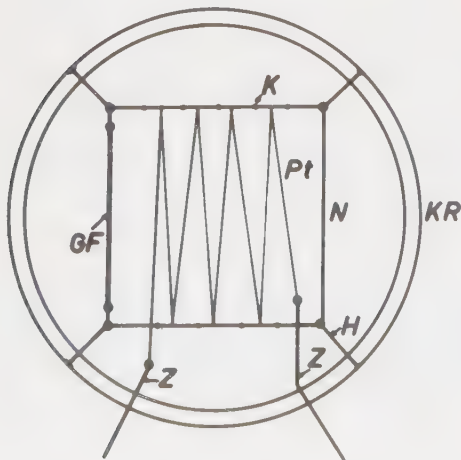


Abbildung 12:

Die Konstruktion des Temperaturmeßfühlers. Maßstab 1:2

KR: 3x3 mm Kunststoffring,

H: Haltedrähte $\varnothing$ 0,5 mm,

N: Nylonfaden (monofil)

$\varnothing$ 0,1 mm, K: Knoten,

GF: Gummifaden $\varnothing$ 0,5 mm,

Z: Zuleitungen $\varnothing$ 0,5 mm,

Pt: Platindraht $\varnothing$ 20 μ .

Der Betrieb hat gezeigt, daß Niederschlag in fester Form und großtropfiger Regen bei großen Windgeschwindigkeiten den Meßfühler zerstören können. Im Winter führen bei Ansatz von Raufrost schon geringe Erschütterungen zum Bruch des Platindrahtes. Aus diesem Grund wird der Platindraht alle 6 Minuten kurzfristig einmal außerhalb der Meßzeit durch einen Strom von 0,1 A geheizt.

Aber auch dann, wenn der Niederschlag den Meßfühler nicht mechanisch zerstört, kann der Meßwert unbrauchbar sein, wenn der Draht naß ist. Der gemessene Wert liegt dann zwischen der Lufttemperatur und der Feuchttemperatur. Diese Zeiten müssen zumeist ausgeschieden werden. Jedoch sind diese Ausfallzeiten wegen des dünnen Drahtes, der nur wenig Wasser festhält, und der hohen Wärmeübergangszahl (s.u.) praktisch mit den Zeiten identisch in denen Niederschlag fällt. Da außerdem an der Station in Garching die Niederschlagszeiten registriert werden, können die durch diesen Effekt gestörten Messungen nachträglich ermittelt werden.

Diesen Fehlerquellen, die nur zu feststellbaren Zeiten die Messung beeinflussen oder unmöglich machen, stehen andere Fehler gegenüber, die mehr oder minder dauernd wirksam sind. Ihre Größenordnung soll jetzt ermittelt werden.

Zusammen mit einigen meteorologischen Annahmen gestattet die Betrachtung der Wärmehaushaltgleichung der Oberfläche des Platindrahtes

$$Q + B + L = 0 \quad (4.3.1)$$

eine Abschätzung dieser Fehler. Dabei ist Q die Strah-

lungsbilanz der Oberfläche, B der Wärmestrom aus dem Inneren des Drahtes und L der Strom fühlbarer Wärme von der Drahtoberfläche in die Luft. Die Vorzeichen seien so gewählt, daß positive Ströme zur Oberfläche fließen.

Für den Strom fühlbarer Wärme L gilt

$$-L = \alpha_L (\vartheta - \vartheta_L) \quad (4.3.2)$$

wobei α_L die Wärmeübergangszahl, ϑ die Temperatur der Oberfläche und ϑ_L die Lufttemperatur ist. Damit erhält man

$$\Delta \vartheta = \vartheta - \vartheta_L = \frac{Q+B}{\alpha_L} \quad (4.3.3)$$

und $\Delta \vartheta$ gibt den Meßfehler an.

Die Wärmeübergangszahl läßt sich nach E. Eckert[5] über die Nusselt-Zahl und die Reynolds-Zahl für erzwungene Konvektion berechnen. Es gilt

$$\alpha_L = \frac{c \left(\frac{u d}{\nu} \right)^m \lambda}{d} \quad (4.3.4)$$

wobei u die Windgeschwindigkeit, d der Durchmesser des Drahtes, λ die Wärmeleitfähigkeit der Luft und ν die kinematische Zähigkeit ist. Die Größen C und m sind in [5] als Funktionen der Reynolds-Zahl tabelliert. Mit den Zahlenwerten für λ und ν für Luft nach [19] wurde die Wärmeübergangszahl berechnet und in Tabelle 3 in Abhängigkeit von Windgeschwindigkeit und Drahtdurchmesser dargestellt.

d \ u	0,1	0,2	0,5	1,0	2,0	5,0	10,0
10	1340	1670	2260	2840	3580	4830	6190
20	830	1050	1420	1790	2220	3100	4030
50	450	570	760	970	1240	1780	2290
100	280	360	480	620	810	1140	1580

Tabelle 3 : Die Wärmeübergangszahl in $\text{mcal/cm}^2\text{min grad}$ in Abhängigkeit vom Drahtdurchmesser d in μ und der Windgeschwindigkeit u in m/s .

Setzt man jetzt zunächst $B = 0$, so kann man den Strahlungsfehler abschätzen. Dazu spaltet man am besten die Strahlungsbilanz in einen kurzwelligen Teil Q_k und einen langwelligen Teil Q_l auf. Betrachtet man zunächst Q_l , so erhält man bei Annahme einer effektiven Ausstrahlung von etwa $130 \text{ mcal/cm}^2\text{min}$ [9], was recht extremen Verhältnissen entspricht, und einer mittleren Reflexzahl von 96 % [19] für Platin ein Q_l von $-5 \text{ mcal/cm}^2\text{min}$, was etwa für eine ebene Platinoberfläche bei wolkenlosem Himmel gilt. Wenn man die geometrischen Verhältnisse berücksichtigt, ergibt sich für den runden Platindraht etwa $Q_l = -2 \text{ mcal/cm}^2\text{min}$. Zusammen mit den Wärmeübergangszahlen nach Tabelle 3 und der Gleichung 4.3.3 berechnet sich der Strahlungsfehler bei einer Windgeschwindigkeit von 20 cm/s zu $\Delta\vartheta = -0,002 \text{ grad}$. Daraus ergibt sich, daß der durch die langwellige Strahlungsbilanz bewirkte Fehler in der Temperaturmessung für einen Platindraht von 20μ Durchmesser selbst bei sehr kleinen Windgeschwindigkeiten, die vorzugsweise nachts auftreten, vernachlässigbar klein ist.

Für Q_k erhält man mit einer Globalstrahlung von $1400 \text{ mcal/cm}^2\text{min}$ (Mittagsstunden eines Sommertages [6]), einer Albedo des Untergrundes von 20 % (Wiese [9]) und einer mittleren kurzwelligen Reflexzahl des Platindrahtes von 50 % [19] unter der Berücksichtigung der geometrischen Verhältnisse als Mittel über die ganze Drahtoberfläche etwa $Q_k = 260 \text{ mcal/cm}^2\text{min}$. Mit diesem Wert erhält man den in Tabelle 4 angegebenen Strahlungsfehler, der außer von der Strahlungsbilanz von der Windgeschwindigkeit abhängt.

In dieser Form ist der Fehler aber für die Streuungen und die Kovarianz bedeutungslos, da ein konstanter Fehler in der Temperaturmessung die Schwankungsgrößen nicht verfälscht. Nur die Änderungen dieses Fehlers gehen in das Ergebnis ein, d.h. Schwankungen der Globalstrahlung und Schwankungen der Windgeschwindigkeit können einen Fehler verursachen. Um diesen Fehler abzuschätzen, ist es nötig, Annahmen über die Schwankungen der Strahlungsbilanz und der Windgeschwindigkeit zu machen.

u	0,1	0,2	0,5	1,0	2,0	5,0	10	m/s
$\Delta \vartheta$	0,31	0,25	0,18	0,14	0,12	0,08	0,06	grd

Tabelle 4: Der Strahlungsfehler der Temperaturmessung für einen frei gespannten Platindraht von 20μ Durchmesser bei Annahme einer Globalstrahlung von $1400 \text{ mcal/cm}^2\text{min}$.

Ändert sich bei einer Windgeschwindigkeit von 2 m/s, was etwa dem Klimamittel von München entspricht, die Strahlungsbilanz um den Wert $\Delta Q = Q$, so ändert sich der Fehler der Temperaturmessung um 0,12 grd (Tab.4). Das liefert einen Fehler in der Streuung von 0,06 grd, wenn genau die Hälfte der Einzelmesswerte mit dem Fehler von 0,12 grd behaftet sind, und die andere Hälfte fehlerfrei ist. Unter der Annahme von einer Streuung der Lufttemperatur von 0,4 grd liefert das einen relativen Fehler von etwa 15 %. Daß der Fehler diesen Wert wirklich erreicht, ist aber sehr unwahrscheinlich, denn einerseits wird die Strahlungsbilanz nicht um den angenommenen Betrag schwanken und andererseits ist bei der angenommenen Globalstrahlung von 1400 mcal/cm²min und 2 m/s Windgeschwindigkeit nach den bisherigen Erfahrungen mit einer fast doppelt so großen Streuung der Lufttemperatur zu rechnen. Außerdem wird der absolute Fehler der Streuung kleiner, wenn mehr oder weniger als die Hälfte der Einzelmeßwerte durch den Strahlungsfehler verfälscht sind. Somit erscheint in diesem Fall die Annahme eines mittleren Fehlers in der berechneten Streuung von etwa 6 % in sommerlichen Mittagsstunden bei heiterem Himmel gerechtfertigt. Zu anderen Tages- und Jahreszeiten und bei bedecktem Himmel wird der Fehler wesentlich kleiner sein.

In der gleichen Weise kann der Einfluß der Änderungen der Windgeschwindigkeit abgeschätzt werden. Nimmt man bei einer konstanten Strahlungsbilanz von 1400 mcal/cm²min und einer Windgeschwindigkeit von 2 m/s eine Änderung

der Windgeschwindigkeit um 50 % an, so bewirkt das eine Änderung des Strahlungsfehlers von 0,02 grd, wie Tabelle 4 zeigt. Das kann maximal einen Fehler von 0,01 grd in der Streuung bewirken. Bei einer Streuung von 0,4 grd bedeutet das einen relativen Fehler von 2,5 %. Auch dieser Fehler kann diesen Wert nur in sommerlichen Mittagsstunden bei heiterem Himmel unter ungünstigen Bedingungen erreichen, im allgemeinen wird er kleiner sein.

Zusammenfassend kann man sagen, daß der durch Änderungen der Strahlungsbilanz und der Windgeschwindigkeit bewirkte Strahlungsfehler in den Streuungen nur in seltenen Fällen die Größenordnung von 6 % erreichen wird. Diese Situationen lassen sich aus den anderen Registrierungen der meteorologischen Parameter, die an der Station in Garching durchgeführt werden, ermitteln und der Fehler kann dann im Einzelfall, wenn es erforderlich ist, abgeschätzt und durch eine Korrektur des Meßwertes verkleinert werden.

Das Glied B in der Formel 4.3.3 enthält den Meßfehler, den die Erwärmung des Platindrahtes durch den Meßstrom verursacht. Wenn man $Q = 0$ annimmt, kann man diesen Fehler getrennt abschätzen. Der Meßstrom beträgt zur Zeit **1mA** , woraus sich bei Annahme einer Windgeschwindigkeit von 2 m/s eine Aufheizung des Platindrahtes von 0,004 grd errechnet. Aber nur die durch die Änderung der Windgeschwindigkeit verursachten Änderungen dieses Aufheizfehlers bewirken einen Fehler bei der Streuung. Damit bleibt dieser Fehler unter Annahme einer Streuung von 0,4 grd sicher unter 1 %.

4.4) Die Meßbrücke.

Bei Schwankungsmessungen ist der Absolutwert der Meßgröße nur von geringem Interesse. Daher ist es auch nicht nötig, die Widerstände der Leitungen Meßfühler-Meßbrücke zu berücksichtigen. Eine Abschätzung zeigt außerdem, daß auch die kurzfristigen Widerstandsänderungen dieser Leitungen infolge von Temperaturschwankungen vernachlässigt werden können. Daher wurde die Meßbrücke als einfache Wheatstone-Brücke in Zweileiterschaltung ausgeführt. Die Brückenspannung ist mit einer Zenerdiode stabilisiert.

4.5) Das Galvanometer.

Als Anzeigeinstrument in der Brücke dient ein Multiflex-Galvanometer MG 1 der Firma Dr. B. Lange, Berlin. Dieses wird gegen Überbelastung bei Bruch des Meßfühlers durch ein Feinrelais geschützt, das bei Ansteigen des Brückenstromes über einen einstellbaren Schwellwert das Galvanometer kurz schließt.

Der Einfluß der Trägheit dieser Galvanometer ist bereits in dem Kapitel 2.4 abgehandelt. Weitere Fehler werden durch das Galvanometer nicht verursacht.

5. DISKUSSION EINIGER MEßERGEBNISSE.

=====

Das hier beschriebene Gerät ist zur Zeit an der Meteorologischen Station am Forschungsreaktor München in Garching eingesetzt und an das dort vorhandene digitale Registriergerät angeschlossen. Im Dauerbetrieb werden alle 6 Minuten die Streuungen und die Kovarianz der Lufttemperatur in 5 und 20 m Höhe gemessen.

Eine ausführliche Beschreibung des Meßplatzes haben G. Hofmann und H. Kraus [12] gegeben. Diese Arbeit enthält außerdem eine Aufstellung der anderen, an der dortigen Station installierten, Meß- und Registriergeräte.

Die Meßergebnisse, die im Folgenden besprochen werden, sollen die mit den Streuungen und Kovarianzen meteorologischer Parameter verbundenen Probleme nicht erschöpfend behandeln; denn das geht über den Rahmen dieser Arbeit hinaus. Eine umfangreiche Analyse der Meßdaten, die mit dem hier beschriebenen Gerät gewonnen werden können, vor allem auch der Kovarianzen, soll erst zu einem späteren Zeitpunkt durchgeführt werden und wird zum Teil Gegenstand von meteorologischen Diplomarbeiten sein. Der Schwerpunkt dieser Arbeit lag auf der Konstruktion und der Erprobung des Gerätes.

5.1) Der Gang der Streuungen der Lufttemperatur in zwei ausgewählten dreistündigen Meßperioden.

An Hand von zwei Meßperioden, die erste fällt in die Nachmittagsstunden, die zweite in die Zeit einer nächtlichen Bodeninversion, soll das Verhalten der Streuung der Lufttemperatur gezeigt werden. Von einer Deutung der Meßergebnisse wird absichtlich weitgehend Abstand genommen, da dazu weitere Messungen, vor allem der Windstruktur, erforderlich sind. Diese können erst durchgeführt werden, wenn die Entwicklung der entsprechenden Meßfühler (s.o.) abgeschlossen ist.

Zur Beschreibung der meteorologischen Situation am Meßplatz dienen die im Abstand von 6 Minuten gewonnenen Meßwerte der Lufttemperatur und die 6-Minuten-Mittel der Windgeschwindigkeit aus 5 verschiedenen Höhen zwischen 2 und 50 m Höhe. In den beiden Fällen, die hier diskutiert werden, wird das Meßmaterial in der gleichen Weise dargestellt. Windgeschwindigkeit und Lufttemperatur sind in Isoplethendarstellung (Abszisse: mittlere Ortszeit (linear), Ordinate: Höhe (logarithmisch)) gezeichnet. Der Höhenmaßstab wurde logarithmisch gewählt, da im Mittel Windgeschwindigkeit und Lufttemperatur sich in Bodennähe entsprechend einem logarithmischen Profil mit der Höhe ändern. Die Isotachen und Isothermen hätten also in diesem Fall bei dieser Art der Darstellung gleichen Abstand in der Vertikalen.

In einer weiteren Darstellung wird der Gang der adiabatisch auf 2 m Höhe reduzierten Lufttemperatur, weiterhin potentielle Temperatur genannt, in den Höhen 2, 5, 10, 20 und 50 m gezeigt. Auf der Abszisse ist auch hier die mittlere Ortszeit und auf der Ordinate die Temperatur, beide in linearem Maßstab, aufgetragen. Scharparameter ist die Höhe. Da die Wahl der Meßhöhen etwa einem logarithmischen Profil entspricht, haben die Kurven dieser Darstellungen bei einem logarithmischen Temperaturprofil etwa gleichen Abstand. Außerdem ist für jeden Fall der Gang der Streuung der Lufttemperatur in 5 und 20 m Höhe in Abhängigkeit von der Zeit dargestellt. Die einzelnen Darstellungen sind in der hier aufgeführten Reihenfolge jeweils zu einer Abbildung zusammengefaßt.

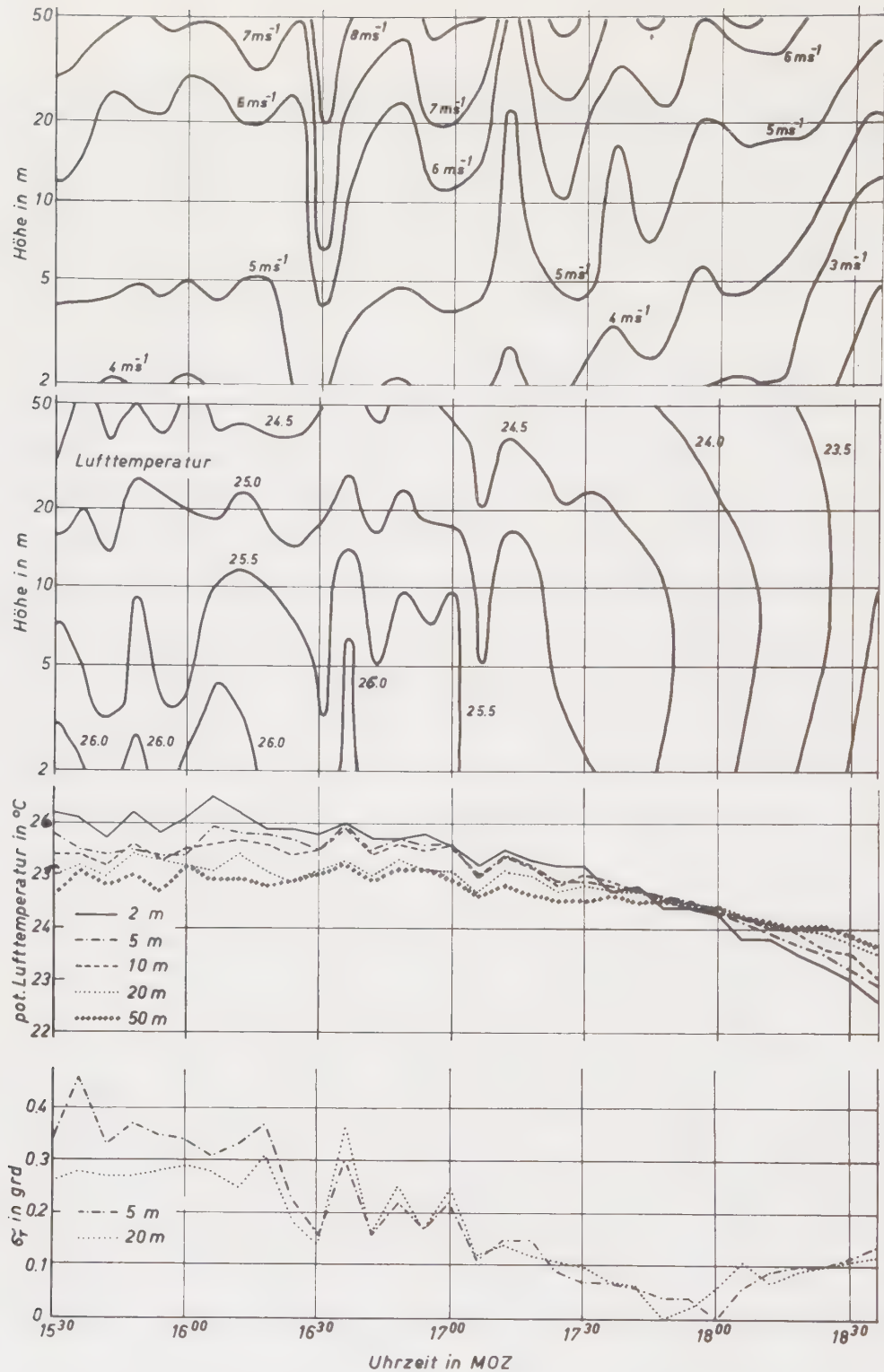


Abbildung 13: Der Gang der Windgeschwindigkeit, der Lufttemperatur und der Streuungen der Lufttemperatur am 11.8.1963 von 15³⁰ bis 18³⁶ MOZ. (Nähere Erläuterungen im Text).

Die Streuungen der Lufttemperatur am 11. 8. 1963 in der Zeit von 15³⁰ bis 18³⁶ MOZ.

In der Abbildung 13 ist in der oben beschriebenen Art und Weise der Verlauf von Windgeschwindigkeit, Lufttemperatur und Streuung der Lufttemperatur aufgetragen. Die Abbildung 13 zeigt recht gut den Ausschnitt aus einem Tagesgang der Streuungen der Lufttemperatur. Von Werten um ca. 0,3 - 0,4 grd am frühen Nachmittag nehmen die Streuungen bis 0,00 grd zur Zeit der Umkehr des Temperaturprofiles, d.h. adiabatischer Schichtung, ab. Daß der Wert Null tatsächlich erreicht wird zeigt außerdem, daß auch in der Horizontalen zu diesem Zeitpunkt keine größeren Temperaturunterschiede vorhanden waren. Nach der Umkehr des Temperaturprofiles wachsen mit dem Aufbau der Bodeninversion auch wieder die Streuungen an.

Etwas näher soll an dieser Stelle noch auf die thermische Konvektion eingegangen werden. Bis um 17¹⁸ sind in der Abbildung 13 einige Konvektionszellen erkennbar. So nimmt in der Zeit kurz vor 16³⁰ die Windgeschwindigkeit in allen Höhen zu, während die Temperatur abnimmt. Den entgegengesetzten Verlauf findet man um 17¹². In diesem Fall steigt die Luft aus niedrigen Höhen, die entsprechend dem Windprofil eine kleinere Geschwindigkeit und entsprechend dem Temperaturprofil eine höhere Temperatur hat, konvektiv auf, während sich der erste Fall als Absinken kälterer Luft aus Höhen über 50 m deuten läßt. Da die Streuung der Lufttemperatur im Normalfall mit der Höhe abnimmt, wie dies auch der relativ ungestörte Verlauf während der ersten Stunde

zeigt, spiegeln sich die einzelnen Konvektionszellen auch im Gang der Streuungen wieder. Dem Absinken entspricht eine Abnahme der Streuungen, dem Aufsteigen eine Zunahme.

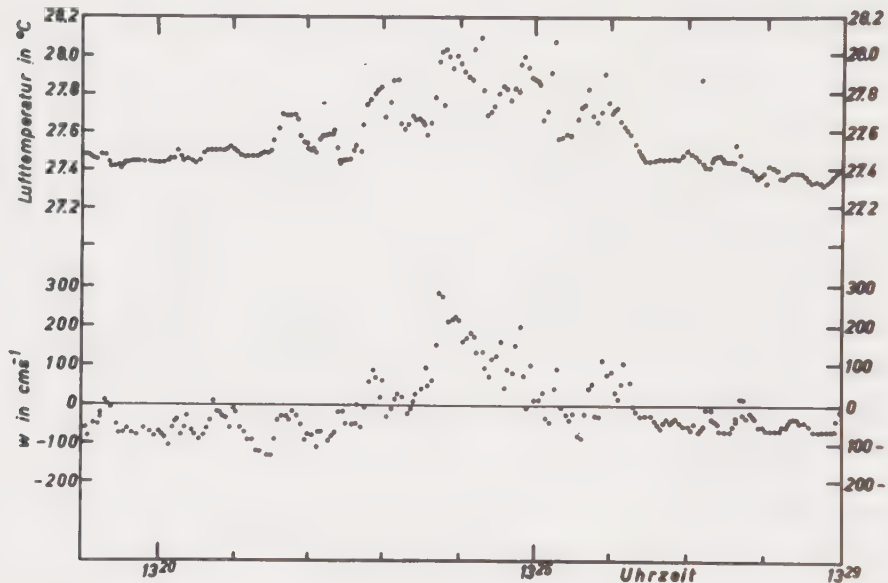


Abbildung 14: Der Gang der Lufttemperatur und der vertikalen Windgeschwindigkeit in 100 m Höhe beim Durchzug eines Konvektionselementes nach A.F. Bunker [2] .

Dieses Verhalten kann man auch in der Abbildung 14, die von A.F. Bunker [2] übernommen wurde, beobachten. Sie zeigt eine Analogregistrierung der Lufttemperatur und der vertikalen Windgeschwindigkeit in 100 m Höhe in Brookhaven am Nachmittag des 31.8.1951. Man sieht, wie bei dem Durchzug eines Aufwindgebietes Temperatur und Temperaturböigkeit steigen.

Daß in der Abbildung 13 noch einzelne Konvektionszellen sichtbar werden, deckt sich außerdem mit Betrachtungen zu Beginn dieser Arbeit, aus denen sich ergibt, daß konvektionsbedingte Schwankungen meteorologischer Parameter auch noch bei Messungen im Abstand von 6 Minuten sichtbar werden. In gleicher Weise geht das auch aus Messungen von H.G. Koch [15], dessen Arbeit die Abbildung 15 entnommen ist, hervor.

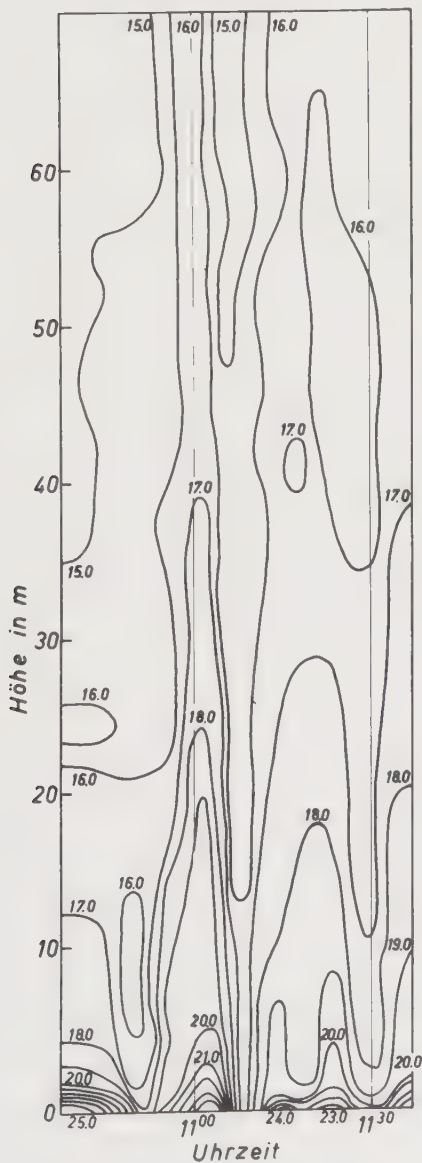


Abbildung 15:
Isoplethen der Lufttempera-
tur in $^{\circ}\text{C}$ zwischen 0 und
70 m Höhe am späten Vor-
mittag eines Sommertages
nach H.G. Koch

Die Streuungen der Lufttemperatur am 13. 7. 1963 von 00⁰⁰ bis 02⁵⁴ MOZ.

Die Meßzeit, für die die Windgeschwindigkeit, die Lufttemperatur und deren Streuung in der oben beschriebenen Weise in der Abbildung 16 dargestellt sind, fällt in eine Inversionslage. Sie wurde gewählt, da die Streuungen während dieser Zeit einen sehr ausgeprägten merkwürdigen Verlauf zeigen. Um solche Fälle zu erklären, ist eine spezielle Untersuchung geplant. Neben einem dichteren Temperaturprofil sind dazu auch unbedingt Messungen der Windstruktur erforderlich, die aber erst zu einem späteren Zeitpunkt (s.o.) möglich sind.

Die Abbildung 16 zeigt zu Beginn des hier untersuchten Zeitraumes um 00⁰⁰ eine Differenz der potentiellen Temperaturen zwischen 50 und 2 m Höhe von 6,1 grd . Wie aus dem nahezu gleichen Abstand der Isothermen ersichtlich ist, ist die Temperaturschichtung in dieser Inversion fast logarithmisch. Die weitere Beobachtungszeit kann man nach dem Verlauf der Windgeschwindigkeit grob in drei Intervalle unterteilen, die zufälligerweise etwa mit den Stunden 00⁰⁰ bis 1⁰⁰, 1⁰⁰ bis 2⁰⁰ und 2⁰⁰ bis 3⁰⁰ übereinstimmen.

In der ersten Stunde ist die Windgeschwindigkeit in allen Höhen fast konstant. Bis in 10 m Höhe konnte mit den Schalenkreuzanemometern kein Wind gemessen werden, die Windgeschwindigkeit lag unter der Anlaufgeschwindigkeit der Anemometer, welche etwa bei 0,7 m/s liegt. In der zweiten Stunde nimmt die Windgeschwindigkeit in allen Höhen zu, um dann in der letzten Stunde wieder gleichmäßig abzunehmen, bis in der untersten Schicht die Windgeschwindigkeit wieder unter der Anlaufgeschwindigkeit der Anemometer liegt.

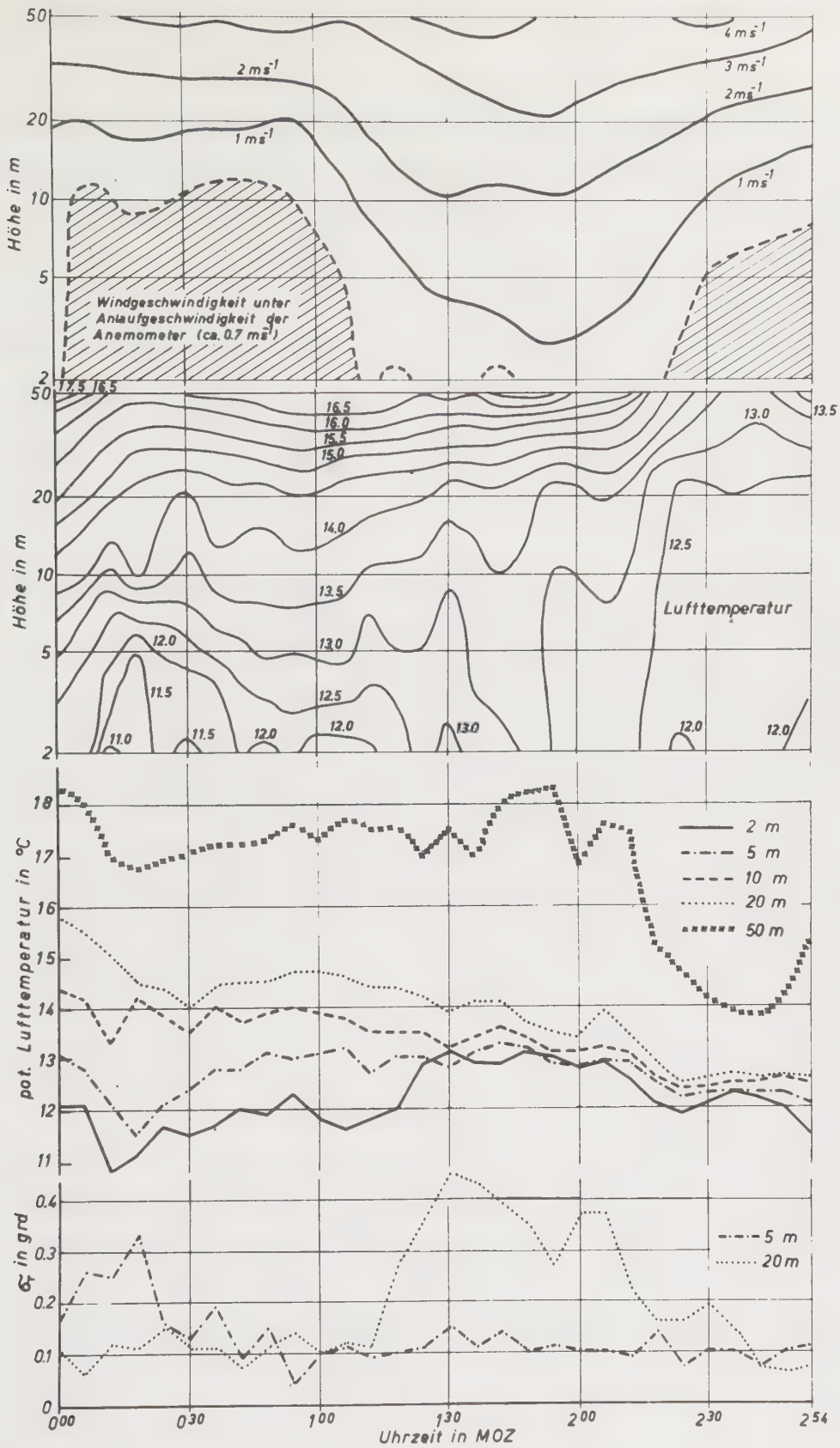


Abbildung 16: Der Gang der Windgeschwindigkeit der Lufttemperatur und der Streuungen der Lufttemperatur am 13.7.1963 von 00⁰⁰ bis 02⁵⁴ MOZ.

Diese Gliederung weist auch der Verlauf der Lufttemperatur in den verschiedenen Höhen auf, wenngleich hier die Verhältnisse nicht so ausgeprägt sind. In der ersten Stunde bleiben die Verhältnisse im wesentlichen unverändert, erst in der zweiten wird die Inversion in der Schicht bis 20 m Höhe zum Teil abgebaut, während gleichzeitig die Differenz der potentiellen Temperatur 20 auf 50 m zunimmt. In der letzten Stunde ist der starke Temperaturrückgang in 50 m Höhe besonders auffällig.

Bei den Streuungen ist das gleichmäßige Anwachsen nach 1^{12} in 20 m Höhe ebenso interessant wie die Tatsache, daß über eine Stunde Werte gemessen werden, wie sie in dieser Größe fast nur am Tage beobachtet werden. Der zeitliche Gang der Streuungen in den zwei Höhen ist sehr unterschiedlich. Erst das Stundenmittel der nach Gleichung 5.2.1 aus der Streuung und dem vertikalen Gradienten der potentiellen Temperatur berechneten Austauschweglänge (siehe Abschnitt 5.2) läßt, wie die Tabelle 5 zeigt, in den beiden Meßhöhen einen gemeinsamen Gang erkennen.

Zeit	λ_5	λ_{20}
MOZ	m	m
0 ⁰⁰ -1 ⁰⁰	0,79	1,20
1 ⁰⁰ -2 ⁰⁰	1,49	3,29
2 ⁰⁰ -3 ⁰⁰	1,40	3,00

Tabelle 5: Stundenmittel der vertikalen Austauschweglänge.

Diese Größe zeigt ihren größten Wert in der Stunde von 1⁰⁰ bis 2⁰⁰, d.h. gerade in der Stunde, in der der Wind in allen Höhen auffrischt.

5.2) Die vertikale Austauschweglänge

Nachdem an zwei Beispielen der Gang der Streuung der Lufttemperatur gezeigt wurde, soll jetzt eine aus diesen Streuungen abgeleitete Größe betrachtet werden. Mit der Streuung σ_T und dem mittleren potentiellen Temperaturgradienten $d\bar{T}/dz$ kann man eine Länge

$$\lambda = \frac{\sigma_T}{d\bar{T}/dz} \quad (5.2.1)$$

definieren. Für 5 Tage hat H. Karstensen [14] aus Streuungen, die mit dem hier beschriebenen Gerät gemessen wurden, Stundenmittelwerte dieser Länge, die weiterhin als Austauschweglänge bezeichnet werden soll, berechnet. Aus diesen Werten wurde für 5 und 20 m Höhe je ein Mittelwert für die Tages- und die Nachtstunden, d.h. für labile und stabile Schichtung, berechnet. (Spalte 3 in Tabelle 6)

Für adiabatische Schichtung gilt nach H. Lettau [17] die Beziehung

$$\lambda_a = 0.45 z \quad (5.2.2)$$

wobei z , von einer Zusatzgröße, die im Rahmen dieser Überlegungen vernachlässigt werden kann, abgesehen, die Höhe über dem Erdboden ist. Die für λ aus den Messungen abgeleiteten Mittelwerte zeigen, wie schon H. Karstensen gesagt hat, qualitativ die zu erwartende Abhängigkeit von der Schichtung, d.h. für labile Schichtung ist λ größer als λ_a und für stabile kleiner

als λ_a . Diese Abhängigkeit läßt sich durch ein Modell von H. Lettau aber auch quantitativ beschreiben.

Neben der Austauschweglänge wird dazu noch eine Geschwindigkeit $\bar{w}$ definiert, die zusammen mit λ von H. Lettau als virtuelle Turbulenzparameter bezeichnet werden. Bei adiabatischer Schichtung ist $\bar{w}$ durch

$$\bar{w}_a = \lambda_a \left(\frac{d\bar{u}}{dz} \right)_a \quad (5.2.3)$$

mit dem mittleren adiabatischen Windprofil $\left(\frac{d\bar{u}}{dz} \right)_a$ und der adiabatischen Austauschweglänge λ_a verknüpft.

Mit dem für die Morgen- und Abendstunden aus Messungen ermittelten mittleren adiabatischen Gradienten der Windgeschwindigkeit findet man in Mittel über die 5 Tage in 5 m Höhe $\bar{w}_a = 0,22$ m/s und in 20 m Höhe $\bar{w}_a = 0,42$ m/s. Nach der Theorie sollte $\bar{w}_a$ nicht von der Höhe abhängen, weswegen für die weitere Diskussion $\bar{w}_a = 0,32$ m/s, was dem Mittelwert aus den Werten für 5 und 20 m Höhe entspricht, angenommen wird.

Zur Beschreibung der nichtadiabatischen Verhältnisse macht H. Lettau zwei Annahmen:

- 1.) Der Quotient von $\bar{w}$ und λ ist von der Schichtung unabhängig.
- 2.) Die Größe $\frac{\bar{w}^2}{\lambda}$, die die Dimension einer Beschleunigung hat, ist gleich der Summe dieses Terms für den adiabatischen Fall und der durch die Auftriebskräfte bewirkten Beschleunigung.

Aus diesen Dimensionsbetrachtungen folgt die Gleichung

$$\lambda = \frac{\lambda_a}{1 + \frac{g \frac{d\bar{T}}{dz} \lambda_a^2}{T \bar{w}_a^2}} \quad (5.2.4)$$

die gestattet, aus den mittleren Gradienten der potentiellen Temperatur und dem adiabatischen Windprofil, die Austauschweglänge für den nichtadiabatischen

Fall zu berechnen. In dieser Gleichung ist g die Schwerebeschleunigung und T die mittlere absolute Temperatur.

1	2	3	4	5	6	7	8
Zeit	Höhe	λ_{gem}	λ_{20}/λ_5	$\lambda_{\text{ber}}(5.2.4)$	λ_{20}/λ_5	$\lambda_{\text{ber}}(5.2.5)$	λ_{20}/λ_5
MOZ	m	m	-	m	-	m	-
8-16	5,	3.0	5.8	2.6	4.9	3.0	6.4
	20	17.3		12.7		19.2	
20-4	5	1.5	1.5	2.0	2.0	1.9	1.5
	20	2.3		4.1		2.8	

Tabelle 6: Mittlere gemessene und berechnete Austauschweglängen für labile und stabile Schichtung.

Im Mittel über die 5 Tage ergeben sich für die Tag- und Nachtstunden die in der Tabelle 6 in Spalte 5 aufgeführten Werte. Wie man sieht, weichen die gemessenen Werte bei labiler und bei stabiler Schichtung stärker von λ_a , das nach Gleichung 5.2.2 für 5 m Höhe 2,25 m und für 20 m Höhe 9,0m beträgt, ab, als die berechneten Werte. Trotzdem wird, wie der Vergleich der Werte zeigt, der Schichtungseinfluß im wesentlichen richtig beschrieben.

Da die Gleichung 5.2.4 durch Dimensionsbetrachtungen gewonnen wurde, die eine dimensionslose Konstante unberücksichtigt lassen, kann man versuchen, die Übereinstimmung des Modells mit den Messungen durch die Anbringung einer Konstanten zu verbessern.

Die modifizierte Gleichung

$$\lambda = \frac{\lambda_a}{1 + \frac{g d\bar{T}/dz \lambda_a^2}{T \tilde{\omega}_a^2}} C \quad (5.2.5)$$

ergibt mit $C=1,8$ die Werte in Spalte 7 der Tabelle 6. Die so berechneten Werte stimmen mit den Meßwerten wesentlich besser überein.

Eine weitere Vergleichsmöglichkeit bietet das Verhältnis λ_{20}/λ_5 , das für den adiabatischen Fall nach (5.2.2) gleich 4 ist. Man sieht, daß auch hier die Gleichung 5.2.5 die Meßergebnisse besser beschreibt als Gleichung 5.2.4 (Spalten 4, 6 und 8 in Tabelle 6).

Abschließend kann man sagen, daß die gemessenen Werte für G_T und die daraus abgeleiteten Austauschweglängen in guter Übereinstimmung mit dem Modell von H. Lettau sind. Dabei sei darauf hingewiesen, daß bei der Verwendung von Mittelwerten für die Meßgrößen eine exakte Übereinstimmung von vornherein nicht erwartet werden kann. Außerdem ist bei H. Lettau die Austauschweglänge nicht durch die Streuungen und den Gradienten der Temperatur, sondern durch die entsprechenden Werte der Windgeschwindigkeit definiert. Nur in diesem Fall ist es sinnvoll von der adiabatischen Austauschweglänge zu sprechen, da bei adiabatischer Schichtung wegen $d\bar{T}/dz = 0$ die Gleichung 5.2.1 keine sinnvollen Werte liefert. Wenn trotzdem in den Formeln und in der Diskussion von adiabatischen Austauschweglängen die Rede ist, so geschieht das im Hinblick darauf, daß in diesem Fall diese Größe durch das Windprofil und die Streuung der Windgeschwindigkeit prinzipiell definiert ist. Daß abweichend von H. Lettau noch eine Konstante eingeführt werden muß, um eine bessere Übereinstimmung zu erzielen, kann sowohl daran liegen, daß die Meßdaten gemittelt wurden, als auch daran, daß die Austauschweg-

längen aus den Temperaturwerten gewonnen wurden. Die Verwendung der Mittelwerte erscheint aber durch das übersichtliche Bild, das sich ergibt, dennoch gerechtfertigt.

Wenn die Entwicklung der Meßfühler zur Messung der Streuung der Windgeschwindigkeit abgeschlossen ist, können auch die aus der Windgeschwindigkeit abgeleiteten Austauschweglängen untersucht werden. Ebenso ist es möglich, an einem umfangreichen Material zu prüfen, ob sich die aus den Temperaturmessungen abgeleiteten Austauschweglängen von den aus Windmessungen gewonnenen systematisch unterscheiden.

5.3) Die Beziehung zwischen der Austauschweglänge und Kovarianz der Temperaturschwankungen in 5 und 20 m Höhe.

Für den gleichen Zeitraum vom 10.7 bis zum 14.7.1963, in dem die oben besprochenen Meßdaten gewonnen wurden, ist in der Abbildung 17 der Zusammenhang zwischen den Stundenmitteln der Austauschweglänge in 20 m Höhe und der Kovarianz der Temperaturschwankungen in 5 und 20 m Höhe, μ_{T_{10}, T_5} dargestellt. Auf der Abszisse ist linear die Kovarianz μ in grd^2 und auf der Ordinate logarithmisch die Austauschweglänge λ_{20} in m aufgetragen. Fälle, in denen der Gradient der potentiellen Temperatur sehr kleine Werte annimmt, d.h. Fälle mit nahezu adiabatischer Schichtung, wurden aus der Untersuchung ausgeklammert, da die mit diesen Gradienten berechneten Weglängen keine sinnvollen Werte liefern. (s.o.)

Die Abbildung 17 zeigt, daß für Austauschweglängen unter 10 m die Kovarianz Werte um Null annimmt. Bei größeren Austauschweglängen wachsen die Kovarianzen sehr schnell an.

An Hand der oben angestellten Überlegungen läßt sich dies leicht qualitativ erklären. Bei stabiler Schichtung ist $\lambda_5 < 2.25 \text{ m}$ und $\lambda_{20} < 9 \text{ m}$ und die Summe aus diesen mittleren Weglängen ist in diesem Fall kleiner als der vertikale Abstand der beiden Meßfühler, der 15 m beträgt. Im Mittel über die Nachtstunden dieser 5 Tage beträgt die Summe der Weglängen sogar nur 3,8 m (s.o.). Das bedeutet eine weitgehende Entkoppelung der Turbulenzvorgänge in den beiden Höhen. Dementsprechend ist in diesen Fällen auch die Kovarianz klein und schwankt um Null.

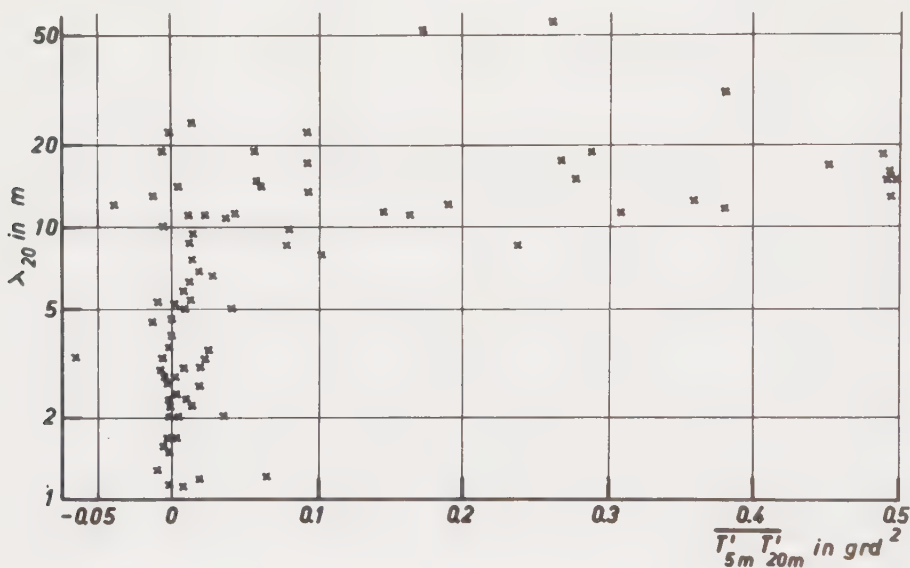


Abbildung 17: Die Beziehung zwischen Stundenmitteln der Austauschweglänge in 20 m Höhe und der Kovarianz der Lufttemperatur in 5 und 20 m Höhe (10.7. - 14.7.1963).

Anders liegen die Verhältnisse bei labiler Schichtung, wo im Mittel über die Tagesstunden in diesen 5 Tagen nach Tabelle 6

$$\lambda_5 + \lambda_{20} = 20.3 \text{ m}$$

ist. Die Summe ist größer als der vertikale Abstand

der Meßfühler und die dadurch bewirkte Verzahnung der Turbulenz in 5 und 20 m Höhe hat ein Anwachsen der Kovarianz zur Folge.

Ein entsprechendes Verhalten zeigt auch der Korrelationskoeffizient $r_{T_5 T_{20}}$, der nach (2.2.3) aus den von dem Gerät gemessenen bzw. berechneten Größen σ und μ berechnet werden kann. So beträgt der mittlere Korrelationskoeffizient am 13.7.1963 für die Zeit von 06⁰⁰ bis 18⁰⁰ 0,28, während sich für die restliche Zeit dieses Tages ein mittlerer Wert von 0,03 berechnet.

6. DER HORIZONTALE TURBULENTE STROM FÜHLBARER WÄRME. =====

An Hand der von H.E. Cramer et.al. [4] durchgeführten Messungen kann man noch weitere Einblicke in die Struktur der turbulenten Eigenschaftsströme in der bodennahen Luftschicht gewinnen. Dabei handelt es sich um ähnliche Messungen, wie sie auch mit dem hier beschriebenen Gerät durchgeführt werden können. Da H.E. Cramer jedoch die Meßergebnisse auf Lochstreifen schreibt und die durchzuführenden Rechnungen erst anschließend ausführt, wurden nur wenige Meßperioden verarbeitet. Die Meßergebnisse zeigen zum Teil sehr interessante Einzelheiten, die aber in einem Punkt nicht richtig gedeutet wurden. So findet

H.E. Cramer et.al., daß der horizontale Wärmestrom im allgemeinen das zweifache des vertikalen beträgt und er schreibt dazu:

"Die Meßergebnisse dieser (Cramers) Untersuchung zeigen sehr klar, daß der Wärmestrom in Richtung der mittleren Strömung im allgemeinen das zweifache des vertikalen Wärmestromes beträgt. Ähnliche Ergebnisse lieferte das Round Hill Research Team in O'Neill (Nebraska) im Jahre 1953 (Lettau und Davidson, 1957 [18]). Es wird vermutet, daß dieser große horizontale Wärmestrom prinzipiell durch die Gegenwart großer Konvektionselemente verursacht wird, die, aus relativ großer Höhe in Bodennähe transportiert, am Meßplatz, in die quasihorizontale Strömung eingebettet, vorüberdriften. Als Folge der Nähe des Erdbodens behalten sie ihre Temperatur und ihre Horizontalbewegung sehr viel länger bei, als ihre Vertikalbewegung. Daher ist der $\overline{uT}$ -Strom tatsächlich das Ergebnis eines vertikalen Austausches, der sich jedoch in einiger Entfernung im Luv des Meßpunktes ereignet hat."

Im Folgenden soll gezeigt werden, daß die oben angegebene Deutung nicht richtig ist, sondern daß vielmehr der horizontale Wärmestrom ursächlich mit den vertikalen Strömen von Impuls und Wärme verknüpft ist.

6.1) Die Meßergebnisse von H.E. Cramer.

In der Tabelle 7 sind die von H.E. Cramer et.al. angegebenen Meßwerte für

$$\overline{uT}, \overline{wT}$$

für labile und stabile Schichtung zusammengestellt.

Die Werte sind Mittelwerte über 5 Fälle mit labiler und über 7 Fälle mit stabiler Schichtung. Die Komponenten der Windgeschwindigkeit u, w beziehen sich auf ein orthogonales Koordinatensystem, dessen z -Achse in der Vertikalen und dessen x -Achse in der Richtung der mittleren Windgeschwindigkeit in der Meßhöhe z_F liegt.

Schichtung	$\overline{uT}$	$\overline{wT}$	Anz. d. Fälle
-	grd m ⁻¹ ms ⁻¹ grd	ms ⁻¹ grd	-
labil	$\frac{dT}{dz} < 0$	-1,65 0,71	5
stabil	$\frac{dT}{dz} > 0$	0,50 -0,17	7

Tabelle 7 : Mittelwerte der Größen $\overline{uT}$ und $\overline{wT}$ für stabile und labile Schichtung nach Messungen von H.E. Cramer [4] in 16 m Höhe.

Die Größen $\overline{wT}$ und $\overline{uT}$ sind nach (2.3.1) dem vertikalen Wärmestrom L_z und dem horizontalen Wärmestrom L_x proportional. Das Verhältnis dieser beiden Wärmestöme

$$\frac{L_x}{L_z} = \frac{\overline{uT}}{\overline{wT}} \quad (6.1.1)$$

ist nach Tabelle 7 für labile Schichtung -2,3 und im stabilen Fall -2,9 .

6.2) Die Deutung der Meßergebnisse.

Nimmt man entsprechend dem eindimensionalen Austauschmodell [9] an, daß ein aus der Entfernung $\dot{l}$ von der Zählfläche stammendes Turbulenzelement die mittlere Eigenschaft dieser Schicht mitbringt, so ist die durch das Teilchen in der Zählfläche bewirkte Schwankung durch

$$\dot{T} = \frac{dT}{dz} \dot{e} \quad , \quad \dot{u} = \frac{du}{dz} \dot{e} \quad (6.2.1 a.b)$$

gegeben, wobei dT/dz der mittlere vertikale Gradient der potentiellen Temperatur und du/dz der der horizontalen Windgeschwindigkeit ist. Für von oben kommende Teilchen wird dabei $\dot{l}$ positiv gesetzt.

Das mittlere Produkt der Größen $\bar{T}$ und $\bar{u}$ mit der Schwankung des Vertikalwindes $\bar{w}$ ergibt dann

$$\overline{wT} = \overline{w\bar{e}} \cdot \frac{d\bar{T}}{dz}, \quad \overline{wu} = \overline{w\bar{e}} \cdot \frac{d\bar{u}}{dz} \quad (6.2.2 a, b)$$

d.h. Größen, die bis auf konstante Faktoren dem vertikalen turbulenten Wärmestrom bzw. Impulsstrom entsprechen.

In analoger Weise ergibt das mittlere Produkt von $\bar{T}$ und $\bar{u}$

$$\overline{Tu} = \bar{e}^2 \cdot \frac{d\bar{T}}{dz} \cdot \frac{d\bar{u}}{dz} \quad (6.2.3)$$

also eine Größe, die einem horizontalen Wärmestrom entspricht. Dieser horizontale Wärmestrom ist - da $d\bar{u}/dz$ in der Regel positiv ist - bei labiler Schichtung, $d\bar{T}/dz < 0$, negativ, d.h. er fließt entgegen der mittleren Windrichtung. Bei stabiler Schichtung, $d\bar{T}/dz > 0$, fließt er in Richtung des mittleren Windes. Er verschwindet bei adiabatischer Schichtung, $d\bar{T}/dz = 0$, und ebenso für $d\bar{u}/dz = 0$.

Die Größe $\bar{l}^2$ ist das Quadrat der in Abschnitt 5.2 definierten Austauschweglänge λ , wenn man zwischen der aus Windmessungen und der aus Temperaturmessungen abgeleiteten Austauschweglänge nicht unterscheidet (s.o.). Wie auch die Messungen zeigen, wird λ nicht Null.

Der horizontale turbulente Wärmestrom ergibt sich auch aus der Anschauung, denn bei labiler Schichtung ist ein von unten kommendes Teilchen wärmer und langsamer als der Durchschnitt der Teilchen in der Zählfläche, bzw. ein von oben kommendes kälter und schneller. Beides entspricht einem Wärmestrom entgegen der mittleren Windrichtung, wie es auch die formale Ableitung ergab.

Der horizontale turbulente Wärmestrom läßt sich also zwanglos mit Hilfe des Austauschmodells erklären, der Annahme großer Konvektionselemente wie bei H.E. Cramer bedarf es daher zu seiner Erklärung nicht.

6.3) Spezielle Überlegungen zum horizontalen turbulenten Strom fühlbarer Wärme.

Angesichts der Größenordnung des horizontalen turbulenten Wärmestroms, stellt sich zunächst die Frage nach dessen Wirkungen, d.h. unter welchen Bedingungen dieser Wärmestrom Erwärmung bzw. Abkühlung eines Luftvolumens bewirkt. Dies kann aber nur dann der Fall sein, wenn der Strom in dem zu betrachtenden Raumelement eine Divergenz aufweist, vorausgesetzt, daß diese nicht durch die Divergenz anderer Wärmeströme kompensiert wird. Dies gilt in gleicher Weise auch für die vertikale Komponente, wenn man z.B. wie H. Kraus [16] den Wärmehaushalt der bodennahen Luftschicht betrachtet.

Die Messungen des vertikalen turbulenten Wärmestromes, auch die mittels Schwankungsgrößen, in einer Höhe $z \neq 0$, dient in den meisten Fällen dazu, die Größe dieses Stromes in der Höhe $z = 0$ zu bestimmen, d.h. durch eine Strommessung in einer gewissen Höhe wird unter der Annahme der Höhenkonstanz dieses Stromes indirekt dessen Quellstärke am Boden gemessen. (In der Bodenoberfläche ist $L_z = 0$!) Bei dem horizontalen Strom ist aber eine Strommessung nicht gleichzeitig auch indirekt eine Divergenzmessung.

Um die Divergenz des horizontalen Wärmestromes direkt zu messen, wären gleichzeitig Messungen dieses Stromes an mindestens zwei räumlich von einander getrennten Punkten in der gleichen Höhe notwendig.

Solange sich aber über die Divergenz des horizontalen Stromes nichts aussagen läßt, ist der Absolutbetrag dieses Stromes praktisch bedeutungslos.

7. S C H L U S S . =====

Es wurde ein Gerät entwickelt und gebaut, das aus Schwankungsmessungen sofort statistische Maßzahlen berechnet, die eng mit den turbulenten Transportgrößen verknüpft sind. Das Gerät gestattet eine kontinuierliche Untersuchung von Schwankungsgrößen, ohne daß erst anschließend an die Messung ein umfangreiches Rechenprogramm durchgeführt werden muß. Die in den Abbildungen 13 und 16 dargestellten Streuungen der Lufttemperatur sind z.B. aus rund 120 000 Einzelwerten automatisch berechnet und jeder berechnete Wert war am Schluß jeder Meßperiode von 6 Minuten Dauer sofort in digitaler Form zugänglich. So eignet sich dieses Verfahren sowohl für eine klimatologische Bearbeitung als auch für die Untersuchung interessanter Einzelsituationen, die man aus dem fortlaufend anfallenden Material heraussuchen kann. In vielen Fällen wird es nämlich unmöglich sein, einen interessanten Fall sofort zu erkennen und was zu diesem Zeitpunkt nicht gemessen wurde, läßt sich nachträglich nicht mehr rekonstruieren.

Gegenstand der bisherigen Arbeit war der Bau und die Erprobung dieses Meß- bzw. Rechengerätes sowie das Eindringen in die Problematik der Schwankungsmessungen. In Zukunft wird es darum gehen, mit diesem Gerät einen Beitrag an der experimentellen Erforschung der Turbulenz und ihrer Wirkungen zu leisten.

Das Gerät, das in der vorliegenden Arbeit besprochen wird, entstand in Zusammenarbeit mit Herrn cand.rer. nat. H. Karstensen, der einen Teil des Gerätes im Rahmen einer Diplomarbeit für Physik gebaut hat.

Dem Leiter des Meteorologischen Instituts der Universität München, Herrn Prof. Dr. F. Möller, bin ich zu besonderem Dank verpflichtet, da ich diese Arbeit an seinem Institut durchführen durfte.

Herrn Prof. Dr. G. Hofmann, von dem die Anregung zu dieser Arbeit ausging, danke ich herzlich für viele fruchtbare Diskussionen und das rege Interesse, das er der Arbeit entgegenbrachte.

Herrn Dipl. Phys. H. Karstensen sei für seinen steten Einsatz beim Bau eines Teiles der Geräte gedankt.

Literaturverzeichnis

- [1] Badgley, F.I. : The Measurement and Statistical Interpretation of Some Small-scale Turbulent Air Motions
New York University, Meteorological Papers 1, No.6 (1952)
- [2] Bunker, A.F.: Diffusion, Entrainment and Frictional Drag associated with Non-saturated, Buoyant Air Parcels rising through a Turbulent Air Mass.
Journal of Meteorology, 10, 212, (1952)
- [3] Büdel, A.: Eine photogrammetrische Methode zum Studium der Strömungs- und Austauschvorgänge.
Beitr. z. Phys. d.f. Atm. 20, 9 (1933)
- [4] Cramer, H.E., Record, F.A., Tillmann, I.E., Vaughan, H.C.: Studies of the Spektra of the Spektra of the Vertikal Fluxes of Momentum, Heat, and Moisture in the Atmospheric Boundary Layer.
(US Dontract Number DA-36-039-SC 80 209)
MIT, Meteorology Department
Annual Report 1961
Final Report 1962
- [5] Eckert, E.: Wärme- und Stoffaustausch.
Berlin 1949
- [6] Fleischer, R., Gräfe, K.: Die Ultrarot-Strahlungsströme aus Registrierungen des Strahlungsbilanzmessers nach Schulze.
Anal.d.Met. 7, 87, (1955)
- [7] Frankenberger, E.: Untersuchungen über den Vertikal-austausch in den untersten Dekametern der Atmosphäre.
Anal.d.Met. 4, 358 (1951)

- [8] Frenzen, P.: A Laboratory Investigation of the
Lagrangian Autokorrelation Funktion in a
Stratified Fluid.
Argonne National Laboratory, ANL-6794, (1963)
- [9] Geiger, R.: Das Klima der bodennahen Luftschicht.
Braunschweig 1961.
- [10] Gurvich, A.S., Zwang, L.R.,: The Spektral Composition
of Turbulent Heat Flow. (engl. transl.)
Bull.Acad.Sci.USSR Geoph.Ser., 1961, S.1033
- [11] Haas, G.: Grundlagen und Bauelemente elektronischer
Ziffernrechenmaschinen.
Philips Techn. Bibl., Hamburg 1961
- [12] Hofmann, G., Kraus, H.: Der Aufbau der meteorologischen
Station beim Forschungsreaktor München.
Wiss.Mitt.d.Met.Inst.d.Universität München, Nr.7
1962
- [13] Hofmann, G.: Wärmestrom, Massenstrom und Volumenstrom.
Arch.Met.Geoph.Bickl., A 11, 465 (1960)
- [14] Karstensen, H.: Ein Analog-Digital-Umsetzer mit Ton-
bandspeicher zur Untersuchung von Schwankungen
meteorologischer Parameter.
Dipl.-Arbeit f. Physik. Ludwig-Maximilians-
Universität München (1963)
- [15] Koch, H.G.: Über Temperatur und Austausch innerhalb
der Bodeninversion.
Gerlands Beitr. z. Geophys. 49, 407 (1937)
- [16] Kraus, H.: Der Tagesgang des Energiehaushaltes der
bodennahen Luftschicht.
Arch.Met.Geoph.Bickl. B, 12, 491 (1963)
- [17] Lettau, H.: Isotropic and Non-isotropic Turbulence
in the Atmospheric Surface Layer.
Geophys. Research Papers No.1, Cambridge (Mass.)
1949.

- [18] Lettau, H., Davidson, B.: Exploring the Atmosphere's First Mile.
London 1957
- [19] Linkes Meteorologisches Taschenbuch
Bd.II, Leipzig 1953
- [20] Marquardt, R.: Untersuchungen der Vertikalbewegungen in der freien Atmosphäre mittels ausgewogener, aus dem Flugzeug gestarteter, Pilotballone über der hohen Rhön 1931
Beitr.z.Phys.d.f.Atm., 20, 18 (1933)
- [21] Meteorology and Atomic Energy
US. Weather Bureau, (1955)
- [22] Pasquill, F.: Atmospheric Diffusion.
London, 1962
- [23] Priestley, D.H.B.: Turbulent Transfer in the Lower Atmosphere.
London, 1959
- [24] Richardson, L.F., Proctor, D.: Diffusion over Distances ranging from 3 km to 86 km.
Memoirs of the Royal Met. Soc., 1, 1 (1926)
- [25] Swinbank, W.C.: An Experimental Study of Eddy Transports in the Lower Atmosphere.
Div.of Met.Phys., Technical Paper No.2.
CSIRO Melbourne 1955
- [26] Valvo-Handbuch Bausteine 1963 (Firmenprospekt).

Lebenslauf

Am 21. Oktober 1932 wurde ich, Rainer Roth, als Sohn des Dipl. Chemikers Dr. Ing. J.F. Roth und seiner Ehefrau Annemarie, geborene Petith, in Darmstadt geboren.

Von Ostern 1939 bis Ostern 1943 besuchte ich die Volksschule in Schönebeck/Elbe und anschließend bis Februar 1947 die dortige Oberschule für Jungen. Von Februar 1947 bis April 1951 war ich Schüler der Oberschule zu Genthin. Nach einjährigem Besuch des Ernst-Moritz-Arndt-Gymnasiums Bonn bestand ich am 18. März 1952 an dieser Schule das Abitur.

Im Sommersemester 1952 begann ich an der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn das Studium der Physik. Vom Sommersemester 1955 an studierte ich an der Ludwig-Maximilians-Universität München. Im Sommersemester 1959 legte ich die Diplom-Hauptprüfung für das Fach Meteorologie ab.

Seit dem 1.1.1963 bin ich am Meteorologischen Institut der Universität München als Verwalter einer wissenschaftlichen Assistentenstelle beschäftigt.

